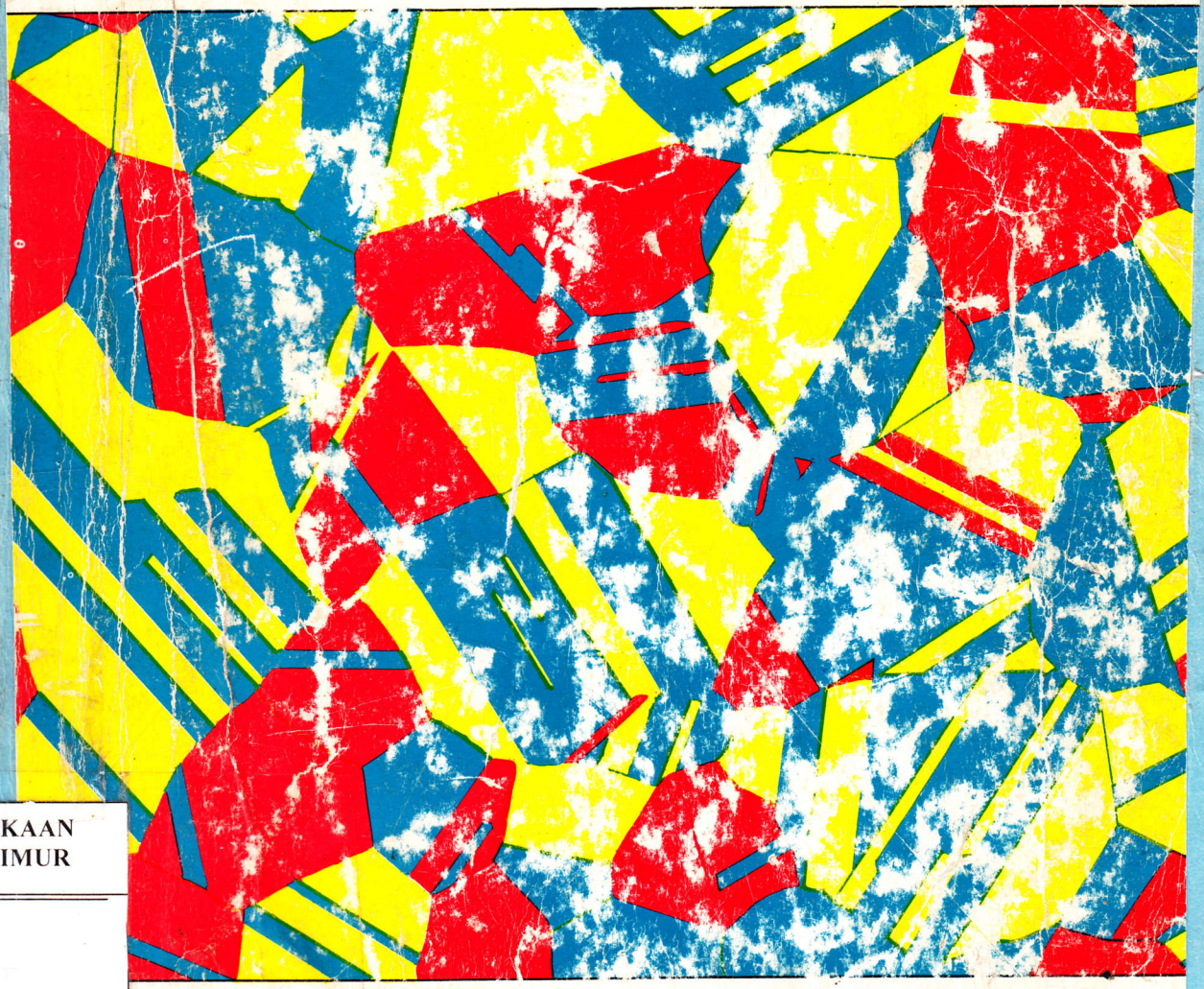
PENGETAHUAN BAHAN TEKNIK

Prof. Ir. TATA SURDIA MS. Met. E.
Prof. DR. SHINROKU SAITO



USTAKAAN
VA TIMUR
0
R

PRADNYA PARAMITA

PRADNYA PARAMITA
Pusat ilmu teknologi dan informasi

UNDANG-UNDANG NOMOR 7 TAHUN 1987

Tentang

Hak Cipta

pasal 44

(1) Barangsiapa dengan sengaja dan tanpa hak mengumumkan atau memperbanyak suatu ciptaan atau memberi izin untuk itu, dipidana dengan pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan / atau denda paling banyak Rp 100.000.000,00 (seratus juta rupiah).

(2) Barangsiapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran Hak Cipta sebagai mana dimaksud dalam ayat (1), dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau denda paling banyak Rp 50.000.000,00 (limapuluh juta rupiah).

PENGETAHUAN BAHAN TEKNIK

OLEH

Prof. Ir. TATA SURDIA, M.S. Met.E.
Guru Besar Institut Teknologi Bandung

Prof. Dr. SHINROKU SAITO
Guru Besar Emeritus, Institut Teknologi Tokyo
Rektor, Universitas Teknologi Nagaoka

Cetakan keempat

PT PRADNYA PARAMITA
JAKARTA

Perpustakaan Nasional : Katalog Dalam Terbitan (KDT)

SURDIA, Tata

Pengetahuan bahan teknik/oleh Tata Surdia, Shinroku Saito. -- Cet. 4 -- Jakarta : Pradnya Paramita, 1999

xiii, 374 hlm. : ilus. : 26 cm

ISBN 979 - 408 - 268 - 6

1. Bahan industri. 1. Judul.

II. Saito, Shinroku.

338.02

260.974/PPR/R 100

MILIK
Perpustakaan Nasional
Propinsi Jawa Timur

PENGETAHUAN BAHAN TEKNIK

oleh : Ir. Tata Surdia, M.S. Met. E
Prof. Dr. Shinroku Saito

© Hak Cipta dilindungi oleh undang-undang

Diterbitkan oleh : PT. Pradnya Paramita
Jalan Bunga 8 - 8A
Jakarta 13140

Cetakan Keempat : Tahun 1999
Dicetak oleh : PT AKA

PRAKATA

Dalam memproduksi suatu barang, bahan merupakan komponen utama yang penting di samping komponen lainnya. Para perancang, para pengambil keputusan dan para ahli teknik produksi perlu menghayati pentingnya bahan teknik, bahkan perlu mengetahui secara pasti bahan yang akan dipakai bagi suatu produk, sehingga nilai produk dalam artian luas menjadi lebih meningkat.

Melihat situasi dan kondisi di Indonesia mengenai perkembangan di bidang pendidikan teknik, di bidang industri serta di bidang pengetahuan teknik, maka buku ini sengaja ditulis dengan harapan dapat memberikan introduksi terhadap pengetahuan lanjut mengenai bahan teknik atau memberikan dasar terhadap pengetahuan teknik lainnya yang berkaitan. Para pemula yang dasar pendidikannya setaraf dengan pendidikan SMA dapat membaca buku ini dengan mudah. Dengan demikian diharapkan buku ini dapat memberikan sumbangan lebih tepat dan lebih cocok terhadap perkembangan teknologi pada umumnya di Indonesia.

Buku ini merupakan buku karangan baru yang ditulis oleh para pengarang di Jepang dan di Indonesia. Para pengarang dari Jepang adalah:

1. Prof. Dr. Shinroku Saito, bekas rektor dan guru besar emeritus dari Institut Teknologi Tokyo, dan sebagai rektor Universitas Teknologi Nagaoka.
2. Prof. Dr. Masahisa Nakamura, guru besar emeritus Institut Teknologi Tokyo dan sebagai profesor di Universitas Teknologi Nagaoka.
3. Prof. Dr. Kirso Ishikawa, guru besar emeritus dari Institut Teknologi Tokyo dan sebagai guru besar di Universitas Ochanomizu.
4. Prof. Dr. Shigekazu Utagawa, guru besar di Institut Teknologi Tokyo.

Para pengarang dari Indonesia adalah:

1. Prof. Ir. Tata Surdia MS. Met. E., guru besar di Institut Teknologi Bandung.
2. Dr. R. A. Nur Mansyuriah T. Surdia, lektor kepala di Institut Teknologi Bandung.

Penulisan buku ini dibiayai dan dikelola oleh "The Association for International Technical Promotion" (AITEP) Tokyo Jepang, yang dipimpin oleh Prof. Dr. Seiji Kaya sebagai ketua dan bapak Koichi Fukui sebagai Sekretaris Jendral.

Usaha kerjasama ini merupakan usaha pionir yang patut dipuji dalam upaya menembus kegelapan alih teknologi dalam situasi yang kurang bagi para penulis Indonesia di bidang teknik.

Ucapan terimakasih disampaikan kepada staf ahli dan karyawan di "Kelompok Teknik Produksi dan Metalurgi" Jurusan Mesin ITB dan di laboratorium Metalurgi Fisik Jurusan Mesin ITB, demikian juga kepada semua fihak yang telah membantu sehingga buku ini dapat diterbitkan.

Bandung, Mei 1984

Prof. ir. Tata Surdia, MS. Met. E

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR 1

BAGIAN I. KONSEP DASAR

1. Pengujian Dan Evaluasi Bahan Industri

1.1 Pengujian Tarik Statik 7
  1.1.1 Daerah elastik 7
  1.1.2 Mulur 10
  1.1.3 Pengerasan regangan 18
  1.1.4 Keliatan dan Keuletan 19
1.2 Pengujian Statik untuk Tekan; Bengkok dan Puntir 20
  1.2.1 Pengujian tekan statik 20
  1.2.2 Pengujian bengkok, lentur statik 21
  1.2.3 Pengujian puntir 23
1.3 Pengujian Keuletan dan Patah Ulet 23
  1.3.1 Transisi liat-getas 26
  1.3.2 Keuletan patah 28
1.4 Kekerasan 31
1.5 Melar (*Creep*) 33
1.6 Kelelahan 35
  1.6.1 Asal retakan 36
  1.6.2 Perambatan retakan lelah 37
1.7 Keausan 37
1.8 Pengaruh Lingkungan pada Kekuatan dan Patahnya Bahan 40
1.9 Cacat Bahan dan Pengujian Tak Merusak 41

2. Faktor Penguat Bahan Industri

2.1 Penguatan dengan Penghalusan Butir 45
2.2 Pengerasan Larutan Padat 46
2.3 Penguatan Presipitasi dan Dispersi 47
2.4 Struktur yang Diperkuat 48

3. Mekanisma Slip Dan Dislokasi

3.1 Dislokasi dan Vektor Burger 49

3.2 Medan Tegangan di Sekitar Dislokasi 50
3.3 Energi Dislokasi 51
3.4 Tegangan Garis Dislokasi dan Gaya yang Bekerja pada Dislokasi 51
3.5 Pelipat Gandaan Dislokasi 52

4. Diagram Fasa Sebagai Dasar Metalografi

4.1 Diagram Fasa Sistem Satu Komponen 53
4.2 Aturan Fasa 54
4.3 Diagram Fasa dari Dua Komponen 54
4.4 Perubahan Fasa pada Pendinginan 56
4.5 Diagram Fasa Dasar dari Sistem Dua Komponen 58
4.6 Keseimbangan dan Difusi 61
4.7 Fasa Metastabil, Keseimbangan Metastabil 62
4.8 Diagram Fasa Sistem Tiga Komponen 63

BAGIAN II. BAHAN-BAHAN LOGAM

1. Besi Dan Baja

1.1 Struktur Mikro Besi dan Baja 69
1.2 Baja Karbon Rendah Bentuk Pelat 73
1.2.1 Struktur dan mampu bentuk baja pelat tipis 73
1.2.2 Pemilihan pelat baja tipis dengan mampu bentuk baik 74
1.3 Baja Pelat yang Dirol Panas dan Baja Kekuatan Tinggi 76
1.3.1 Kekuatan dan keuletan baja pada temperatur rendah 76
1.3.2 Mampu las baja 77
1.3.3 Penguatan baja untuk proses pengelasan 78
1.3.4 Mampu bentuk baja yang dirol panas 81
1.4 Penggunaan Baja Untuk Kekuatan dan Keuletan 82
1.4.1 Kekerasan baja setelah dicelup dingin dan mampu keras 82
1.4.2 Baja paduan untuk konstruksi mekanik 84
1.4.3 Pengerasan kulit 85
1.4.4 Kegetasan temper 86
1.5 Baja Yang Mempunyai Kekerasan Tinggi Sebagai Sifat Utamanya 88
1.5.1 Baja pegas 88
1.5.2 Baja bantalan 89
1.5.3 Baja perkakas dingin 89
1.5.4 Baja perkakas panas 92
1.5.5 Baja kecepatan tinggi 93
1.6 Baja Kekuatan Sangat Tinggi 95
1.6.1 Baja martensit 96
1.6.2 Baja pengerasan kedua 98
1.6.3 Baja olah austenit 98
1.6.4 Baja maraging 100

1.7 Baja Tahan Karat 101
1.7.1 Pengaruh unsur-unsur paduan pada ketahanan karat dari besi 101
1.7.2 Struktur baja tahan karat 101
1.7.3 Pemilihan baja tahan karat 103
1.8 Baja Tahan Panas dan Paduan Tahan Panas yang Super 107
1.8.1 Baja tahan panas ferit 108
1.8.2 Baja tahan panas austenit 109

2. Besi Cor

2.1 Struktur Besi Cor 113
2.1.1 Pembekuan besi cor 113
2.1.2 Struktur besi cor 114
2.1.3 Kekuatan besi cor 116
2.1.4 Besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi 116
2.2 Coran Cil 116
2.2.1 Pengaruh unsur-unsur paduan pada dalamnya cil 117
2.2.2 Perlakuan panas besi cor cil 117
2.2.3 Penggunaan coran cil 117
2.3 Besi Cor Maleabel 118
2.4 Besi Cor Nodular 118
2.4.1 Pencairan besi cor nodular 119
2.4.2 Struktur dan sifat-sifat mekanik besi cor bergrafit bulat 120
2.5 Besi Cor Paduan 120

3. Tembaga Dan Paduannya

3.1 Tembaga Murni 121
3.1.1 Pengaruh oksigen 121
3.1.2 Pengaruh hidrogen 122
3.1.3 Tembaga deoksidasi 123
3.2 Paduan Tembaga 124
3.2.1 Kuningan 124
3.2.2 Perunggu (brons) 125
3.2.3 Paduan tembaga yang dapat dikeraskan dengan presipitasi 126

4. Aluminium Dan Paduannya

4.1 Dasar Perlakuan Panas Paduan Aluminium 129
4.1.1 Pengerasan presipitasi atau pengerasan penuaan 129
4.1.2 Perubahan struktur dalam yang diikuti oleh presipitasi 130
4.1.3 Perubahan sifat-sifat mekanis yang disertai oleh presipitasi 133
4.2 Aluminium Murni 134
4.3 Paduan Aluminium 135
4.3.1 Klasifikasi paduan aluminium 135

4.3.2 Paduan Al utama 135

5. Magnesium Dan Paduannya

5.1 Perkembangan Magnesium dan Paduannya 143
5.2 Sifat-Sifat Magnesium dan Paduannya 144
5.2.1 Paduan Mg untuk coran 144
5.2.2 Paduan Mg tempaan 145
5.2.3 Paduan tempaan temperatur tinggi 145

6. Logam Logam Lain Dan Paduannya

6.1 Titanium dan Paduannya 147
6.1.1 Perlakuan panas paduan titanium 147
6.1.2 Paduan titanium fasa α 148
6.1.3 Titanium fasa $\alpha+\beta$ 148
6.1.4 Paduan titanium fasa β 148
6.2 Nikel dan Paduannya 148
6.2.1 Paduan Ni-Cu 150
6.2.2 Paduan Ni-Cr 150
6.3 Seng dan Paduannya 150
6.4 Timbal dan Paduannya 150

7. Bahan Listrik Dan Magnet

7.1 Hantaran Listrik Super dan Penggunaannya 151
7.1.1 Medan magnet kristis dan kuat arus kritis 152
7.1.2 Penggunaan hantaran super 152
7.2 Bahan Magnet 153
7.2.1 Kurva pemagnetan 153
7.2.2 Besi silikon 154
7.2.3 Paduan Fe-Ni lunak 155
7.2.4 Ferit lunak dan Garnet 157
7.3 Bahan Magnet Keras 157
7.3.1 Bahan magnet permanen 157
7.3.2 Bubuk halus dan bahan magnet film tipis 158

8. Logam Dan Paduan Dibuat Dengan Teknik Metalurgi Bubuk

8.1 Keuntungan dan Kerugian Metalurgi Bubuk 159
8.1.1 Keuntungan metalurgi bubuk 159
8.1.2 Kerugian pada teknik metalurgi bubuk 160

8.2 Bahan Logam dengan Titik Cair Tinggi 161
8.2.1 W dan paduannya 161
8.2.2 Paduan untuk kontak listrik 161
8.2.3 Mo dan paduannya 161
8.3 Karbida Sinteran dan Perkakas Cermet 161
8.3.1 Paduan WC-Co 162
8.3.2 Paduan WC-TiC-Co dan paduan WC-TiC-TaC-Co 164
8.3.3 Cermet TiC 164
8.3.4 Perkakas dengan bahan dasar keramik Al_2O_3 dan paduan komposit intan 165
8.4 Komponen Mesin yang Disinter 165
8.4.1 Komponen mesin sinteran dari besi 165
8.4.2 Komponen sinteran bukan besi 167
8.4.3 Bahan komposit tahan panas 168

BAGIAN III. BAHAN POLIMER

1. Ilmu Polimer Dan Sifat-sifat Bahan Polimer

1.1 Masa Jenis 173
1.2 Sifat-sifat Mekanik 174
1.2.1 Kekuatan tarik 179
1.2.2 Sifat tekukan, lenturan 183
1.2.3 Sifat-sifat pada penekanan 183
1.2.4 Kekuatan impak 185
1.2.5 Kekerasan 186
1.2.6 Ketahanan aus dan gesekan 188
1.2.7 Ketahanan lelah 189
1.3 Sifat-Sifat Termal 191
1.3.1 Koefisien pemuaian termal 192
1.3.2 Panas jenis 193
1.3.3 Koefisien hantaran termal 194
1.3.4 Titik tahan panas 194
1.4 Sifat-Sifat Listrik 197
1.4.1 Kekuatan hancur dielektrik 198
1.4.2 Tahanan isolasi 199
1.4.3 Tahanan permukaan 200
1.4.4 Konstanta dielektrik (Faktor kerugian dielektrik) 200
1.4.5 Elektrifikasi 203
1.5 Sifat-Sifat Kimia 203
1.5.1 Kelarutan 203
1.5.2 Tahanan kimia 204
1.6 Kemampuan Nyala, Tahanan Nyala 206
1.7 Ketahanan Lama 208

2. Polimer Termoplastik

2.1 Resin untuk Penggunaan Umum 209
2.1.1 Polietilen 209
2.1.2 Polipropilen 212
2.1.3 Polistiren 213
2.1.4 Polimetil metakrilat (Resin metakrilat) 215
2.1.5 Polivinil khlorida 217
2.1.6 Khlorida Poliviniliden 218
2.1.7 Polivinil asetat, polivinil alkohol dan polivinil asetal 219
2.1.8 Resin kopolimer 221
2.1.9 Turunan selulosa 223
2.2 Plastik Industri 224
2.2.1 Poliamida (Nylon) 224
2.2.2 Poliasetal 229
2.2.3 Polikarbonat aromatik 230
2.2.4 Resin poliester termoplastik jenuh 232
2.2.5 Polisulfon 233
2.2.6 Polifenilen oksida (PPO) 233
2.3 Polimer Lain 234
2.3.1 Fluoropolimer 234
2.3.2 Resin silikon 235

3. Karet

3.1 Karet Alam 239
3.2 Karet Butadien 240
3.2.1 Kopolimer stiren-butadien (SBR) 240
3.2.2 Karet nitril (Butadien akrilonitril kopolimer, BUNA N, NBR) 240
3.3 Karet Polisulfida (Tiokol) 241
3.4 Karet Uretan 241
3.5 Karet Olefin 242
3.6 Karet Etilen Propilen 242

4. Bahan Tambahan

4.1 Bahan Pemlastis 243
4.2 Bahan Penyetabil 245
4.2.1 Bahan penyetabil panas 245
4.2.2 Antioksidan 246
4.2.3 Penyerap ultra lembayung (UV) 246
4.2.4 Pelambat api 246
4.3 Pengisi 246
4.4 Lain-lain 249

5. Resin Termoset

5.1 Resin Fenol 253
5.2 Resin Urea-Formaldehid (Resin Urea) 254
5.3 Resin Melamin 255
5.4 Resin Poliester Tak Jenuh 256
5.5 Resin Epoksi 258
5.6 Resin Poliuretan 261
5.7 Lain-lain 261

6. Bahan Polimer Yang Tahan Panas

6.1 Poliimida 263
6.1.1 Email pyle ML 263
6.1.2 Film poliamida (Kapton) 264
6.1.3 Bahan cetakan (Vespel) 264
6.2 Lain-lain 264

7. Resin Penukar Ion 267

8. Penggunaan

8.1 Serat dan Film 271
8.1.1 Serat 271
8.1.2 Film 272
8.2 Bahan Komposit 280
8.2.1 Penguatan 281
8.3 Pencetakan 282

BAGIAN IV. BAHAN KERAMIK

PENDAHULUAN 287

1. Kimia Kristal Dari Bahan Keramik

1.1 Ikatan Atom 289
1.1.1 Struktur atom 289
1.1.2 Sifat ikatan antar atom dan klasifikasinya 289
1.2 Struktur Kristal 295
1.2.1 Ikatan tidak mengarah dan struktur ion sederhana 295
1.2.2 Ikatan terarah dan struktur kovalen sederhana 301
1.2.3 Campuran ikatan kristal rumit 301

2. Sifat-sifat Bahan Keramik

2.1 Sifat-sifat Mekanik 303
2.1.1 Kekuatan dan patahan teoritis 303
2.1.2 Kekuatan dan struktur 306
2.1.3 Kekerasan 307
2.1.4 Kekuatan pada temperatur tinggi 307
2.2 Sifat Termal 308
2.2.1 Titik cair 308
2.2.2 Kapasitas panas 310
2.2.3 Pemuaian termal 311
2.2.4 Konduksi termal 313
2.2.5 Tegangan termal dan tahanan kejut termal 314
2.3 Sifat Listrik dan Magnet 315
2.3.1 Pita energi dan hantaran listrik 315
2.3.2 Konduktor ion 317
2.3.3 Polarisasi dan dielektrisitas 318
2.3.4 Kemagnetan 320
2.4 Sifat-sifat Lainnya 321
2.4.1 Sifat optik 321
2.4.2 Sifat kimia 325

3. Keramik Putih

3.1 Pendahuluan (Klasifikasi) 327
3.2 Komposisi Peralatan Putih Triaksial 328

4. Semen, Mortar, Beton

4.1 Definisi dan Klasifikasi Semen 331
4.1.1 Definisi dan klasifikasi 331
4.2 Mortar dan Beton 332
4.2.1 Definisi 332
4.2.2 Mortar 332
4.2.3 Beton 333
4.3 Sifat-sifat Beton 335
4.3.1 Perancangan campuran beton 335
4.3.2 Sifat-sifat beton 335
4.4 Produk Semen dan Produk Beton 336
4.4.1 Produk semen diperkuat serat 336
4.4.2 Beton otoklaf ringan (ALC) 336

5. Gelas

5.1 Pendahuluan (Definisi dan Klasifikasi) 337

5.2 Komposisi Kimia 337
5.2.1 Gelas lembaran 337
5.2.2 Gelas wadah 337
5.2.3 Gelas optik 337
5.2.4 Gelas fisikokimia dan gelas kedokteran 340
5.2.5 Gelas listrik 340
5.3 Sifat dan Penggunaan 341
5.3.1 Sifat termal dan penggunaan 341
5.3.2 Sifat optik dan penggunaannya 343
5.3.3 Sifat mekanik gelas dan penggunaannya 344

6. Email

6.1 Pendahuluan 347
6.2 Sifat dan Penggunaan 347

7. Refraktori

7.1 Pendahuluan (Penggolongan) 349
7.2 Sifat dan Penggunaan 352
7.2.1 Sifat kimia dari refraktori dan penggunaannya 352

8. Isolator Termal

8.1 Pendahuluan 355
8.2 Sifat dan Penggunaan 355
8.2.1 Bahan isolasi termal bentuk serat 355
8.2.2 Bahan isolasi dalam bentuk bubuk dan bentuk bata 356

9. Bahan Abrasif

9.1 Pendahuluan 359
9.2 Sifat dan Penggunaan 359
9.2.1 Abrasif 359
9.2.2 Batu gerinda 360
9.2.3 Ampelas 361

10. Keramik Khusus

10.1 Keramik Elektronik 363
10.1.1 Bahan isolasi 363
10.1.2 Bahan dielektrik 364

10.1.3 Bahan piezoelektrik 365
10.1.4 Bahan semikonduktor 365
10.1.5 Jenis bahan semikonduktor 368
10.2 Keramik Magnet 369
10.3 Bahan Refraktori Temperatur Tinggi 370
10.4 Karbon dan Grafit 371
10.5 Keramik teknik 371
10.5.1 Bahan tahan panas dan berkekuatan tinggi 371
10.5.2 Bahan tahan aus dan permukaan halus 373
10.5.3 Bahan mampu mesin 373
10.6 Perkakas Pemotomg 374

KATA PENGANTAR

Sejarah peradaban manusia dapat dibagai menjadi tiga zaman, yaitu zaman batu, zaman perunggu dan zaman besi. Batu, perunggu dan besi ternyata merupakan bahan yang melambangkan penggunaan populer di zaman-zaman tersebut. Telah disadari bahwa bahan sangat berhubungan erat dengan kehidupan manusia di setiap zaman tersebut.

Ketiga zaman tersebut telah mengungkapkan fakta mengenai pemanfaatan api. Dengan kata lain, orang mengetahui apakah api dipergunakan atau tidak di setiap zaman itu, dan sampai berapa tinggi temperatur yang dapat dicapai dan seterusnya. Tidak ada yang dapat dikatakan kecuali bahwa manusia di zaman batu belum dapat memanfaatkan penggunaan api secara baik. Zaman perunggu berkembang setelah manusia secara terus-menrus bertahun-tahun mempergunakan api. Hal tersebut seharusnya dimulai dari suatu penemuan bahwa api dapat menjadi sangat panas dengan mengurungnya oleh salah satu cara. Karena tembaga murni tidak akan dibuat banyak, suatu kebetulan yang menguntungkan terjadi pada pertama kalinya logam tembaga terbentuk, walaupun dengan banyak ketakmurnian, dengan pembakaran yang tidak sempurna sehingga bersifat reduktif. Satu keberuntungan lain terjadi pula, bahwa tembaga keras diperoleh dengan pendinginan spontan bukan dengan pendinginan cepat di air, karena tembaga tereduksi itu dibuat pada temperatur yang relatif rendah, di mana tidak diperlukan teknik khusus yang dikenal sekarang yaitu pencelupan dingin.

Ternyata telah diperlukan waktu yang sangat lama untuk mempelajari ketrampilan dalam mempergunakan temperatur lebih tinggi sebelum besi ditemukan. Pada waktu yang sama seperti diperkirakan dari peralatan tanah yang berasal dari zaman kuno yang ditemukan dari penggalian, manusia sudah dapat membuat api sepanas 700–800°C pada tahap-tahap awal penggunaan api. Kemudian zaman modern lahir ketika batas penghalang temperatur 1500°C dipecahkan. Dalam jangka waktu yang sangat singkat, dalam 30 tahun terakhir, temperatur di atas 2000°C sudah dipakai di industri, dan setelah itu dengan pengembangan yang pesat dari nyala jet plasma, tanur bayangan busur listrik dan laser, ribuan bahkan puluhan ribu derajat celsius sudah dipakai pada proses biasa. Di fihak lain, untuk fusi nuklir yang diarahkan pengembangannya di abad ke 21, temperatur setinggi beberapa puluh juta derajat dan bahkan ratusan juta derajat celsius untuk memelihara temperatur plasma inti, telah diharapkan untuk dimanfaatkan, di mana hal tersebut bukanlah suatu impian lagi.

Selanjutnya, mengapa sejarah temperatur tinggi telah dikemukakan secara ringkas, tidak lain ialah untuk menjelaskan sejumlah teknik yang sangat pesat penerapannya pada proses pembuatan bahan dengan temperatur sangat tinggi yang diperoleh dari pengembangan 30 tahun terakhir. Sebagai contoh, kalau campuran terdiri dari gas yang mengandung Si seperti monosilan atau klorosilan dan gas lain yang mengandung C seperti metana, sebagian dipanaskan cepat ke temperatur super tinggi dengan iradiasi atau dengan sinar laser, penguraian dan sintesis terjadi mendadak dalam campuran gas tersebut, dihasilkan SiC sebagai partikel terpisah. Selanjutnya dengan meniup partikel terpisah SiC ke dalam nyala plasma memungkinkan pelarutan dan pelapisan bahan secara cepat dan simultan dengan proses penyemprotan. Untuk proses pemotongan dan pengelasan pada temperatur tinggi dan atau bahan yang kekerasannya tinggi, diperlukan temperatur super tinggi, yang

pada waktu ini dipelajari secara pesat bukan hanya untuk logam tersebut tetapi juga untuk keramik.

Kembali kepada pembahasan semula, satu hal perlu dicatat pada pembagian sejarah peradaban manusia semenjak zaman batu. Kalau keramik yang ada sekarang mewakili zaman batu dan logam mewakili zaman perunggu dan zaman besi, maka sama sekali tidak ada bahan organik yang ditemukan di manapun. Bahan organik berupa polimer adalah benar-benar bahan baru yang pertama ditemukan manusia di zaman modern setelah melalui sejarah perkembangan yang lama. Selanjutnya pada permulaan abad ke 20 peleburan aluminium dengan listrik dikembangkan ke industri, maka logam ringan yang pertama dalam sejarah digunakan secara praktis. Pada masa sekarang manusia menyadari bahwa impiannya terbang di udara sangat meningkatkan permintaan akan bahan ringan yang memiliki kekuatan tinggi. Permintaan yang tinggi itu telah dipenuhi dengan adanya bahan polimer organik sebagai dasar, yang ke dalamnya bahan lain berupa serat gelas, serat grafit atau serat logam dicampur secara homogen membentuk bahan komposit yang diperkuat oleh serat. Di samping itu pengembangan paduan aluminium hasilnya diwakili oleh duralumin yang terdiri dari Al dengan 4-6% Cu sebagai unsur paduan utama, sedangkan studi lanjut mengenai peleburan titanium dan paduan Ti-Al telah menghasilkan paduan titanium berkekuatan tinggi yang merupakan bahan yang sangat diharapkan untuk dapat dikembangkan lanjut di masa datang. Selanjutnya dalam memenuhi permintaan untuk menemukan bahan baru yang ringan, kuat, tahan panas, tahan oksidasi dan lainnya, pengembangan industri penerbangan dan ruang angkasa telah membuat keramik seperti SiC, Si_3N_4 dst, yang kelihatannya merupakan bahan baru untuk temperatur tinggi yang dapat dipergunakan untuk komponen mesin yang perlu menahan temperatur tinggi antara 1000-1300°C menggantikan logam tahan temperatur tinggi dari paduan krom.

Dari sudut pandangan di atas, kalau sejarah peradaban silam dibagi menjadi zaman batu, zaman perunggu dan zaman besi, maka sekarang setelah zaman besi diberi suatu nama dari bahan baru, mungkin kurang cocok kalau disebut zaman polimer atau zaman logam ringan barangkali lebih cocok kalau disebut zaman multipleks. Hal tersebut mirip dengan perubahan menu atau kebiasaan makan dari manusia. Nenek moyang manusia yang dikatakan berasal dari isektivora, berbeda dengan mamalia lainnya, mempunyai kemampuan untuk menyesuaikan diri terhadap perubahan lingkungan dalam makanan dengan mempertahankan hidupnya dengan memakan bukan satu macam makanan saja tetapi segala macam makanan termasuk berbagai binatang dan tumbuhan karena bebas dari kebiasaan, dan selanjutnya mampu mengatasi kondisi hidup yang sangat sukar dengan mengembangkan cara pengawetan dan pemasakan makanan. Sekarang, akibat hubungan antara keperluan yang diminta, baik dengan bahan maupun dengan manusia yang mengembangkannya, maka bahan yang memiliki berbagai faktor dapat disediakan untuk mengatasi berbagai keperluan. Hal ini berguna untuk merangsang peradaban dan secara simultan menghadapi tantangan dalam masalah sumber. Selanjutnya sumber energi yang terpendam seperti minyak bumi, arang batu, dst, telah dipakai secara tak terbatas untuk memproduksi bahan, tetapi karena perkembangan dalam bahan untuk pembangangkit tenaga matahari, energi matahari tersedia tak terbatas, dapat dimanfaatkan sebagai energi yang berguna bagi kehidupan manusia. Di masa depan ada kemungkinan untuk mengembangkan bahan baru yang dihasilkan dengan energi yang berasal dari bahannya sendiri, atau yang terpakai dapat diuraikan dan dihasil-ulang sehingga dapat mendaur-ulang sumbernya. Kenyataan aliran sungai, gelombang, asimilasi karbon ke tanaman, dan seterusnya, hanya terbatas pada 10^{-5} dari energi yang ditransmisi oleh matahari. Yang tak digunakan adalah 99,999% dari energi tersebut dan menghilang dalam ruang. Bila 0,001% dapat dikonsumsi secara betul-betul, maka energi tersebut masih jauh lebih banyak dari pada energi yang dibutuhkan oleh manusia. Bila dipandang dari sudut lain, maka masih mungkin untuk mendaur-ulang

sumber secukupnya dengan penggunaan penuh energinya.

Sementara itu, buku ini menerangkan secara sederhana dan mudah mengenai logam, polimer dan keramik, tak terbatas pada daerah sempit masing-masing ilmu saja, tetapi secara umum dengan mengkombinasi ketiga kelompok bahan ini. Namun, seperti tampak dari Bagian I sebagai PENGETAHUAN DASAR, ketiga kelompok ini seyogianya sejak semula dievaluasi dari titik tolak yang sama. Jadi, sangat diharapkan bahwa terpisah dari studi konvensional dalam meneliti benda, yang dikembangkan dan dievaluasi dalam masing-masing kelompok, bagaimana memperoleh suatu cara berpikir yang bebas untuk membudayakan pengertian yang mencakup keseluruhan secara spontan.

Yang dievaluasi adalah sifat-sifat seperti kekuatan, kekerasan, ketahanan kimia maupun ketahanan terhadap kondisi pemakaian dan lain-lainnya, dan juga dibahas dalam Bagian I bagaimana karakteristik tersebut didisain dalam bahan, dengan contoh misalnya faktor penguatan bahan. Sekarang, suatu pertanyaan perlu ditinjau secara khusus di sini, yaitu apakah sifat itu? Secara dasar, sifat adalah konsep bila dipertimbangkan sebagai medium pengukuran, apakah mereka memenuhi kondisi yang berlaku atau tidak. Misalnya, distribusi tegangan yang diterima oleh bahan yang dipakai adalah rumit dan tak hanya terbatas pada tegangan tunggal, geseran sederhana, torsi dan sebagainya, tetapi diperluas sampai tensor tegangan campuran, yang dapat dijumpai di titik yang dipilih dalam bahan. Analisis tensor lebih baik diterapkan setelah buku ini selesai dibaca, tetapi sesungguhnya itu adalah problema ilmu bahan untuk dipelajari bagaimana kekuatan dengan berbagai faktor yang mewakili tegangan yang demikian rumit, dapat terjadi. Apabila tegangan yang dihasilkan yang sesuai dengan gaya beban luar tak dapat diterima lagi, maka bahan akan patah. Hal ini disebut patah liat atau patah getas, tergantung pada perpanjangannya, apakah terjadi segera sebelum robekan atau tidak. Yang pertama adalah kelakuan khas dari patahan dalam logam dan yang terakhir dalam keramik. Kemudian, mengapa patah terjadi pada tegangan tertentu? Ada macam-macam sifat yang harus ditinjau, yaitu jenis atom yang membentuk bahan itu, bentuk kristal di mana atom didislokasikan, kesempurnaan kristal, modus agregasi bila kristal saling mendekat untuk menjadi bahan, ukuran mikro kristal, distribusi dan arahnya, keadaan batas kristal, kekosongan dan ketakmurnian yang menyatu dalam kristal, retakan rambut di antara kristal yang diteruskan lewat beberapa kristal, dan selanjutnya, bukan saja struktur dalam tetapi permukaan bahan apakah ada cacat atau tidak, tempat cacat, dan apa peran dari panjang, arah, dalamnya, bentuk dan sebagainya, terhadap pemusatan tegangan dan seterusnya. Jadi, walaupun dalam kasus sederhana dari tegangan patah, itu merupakan hal yang rumit untuk dijelaskan dengan konsep umum yang samar, yang tidak dapat diterapkan pada kondisi sebenarnya. Maka sifat-sifat dapat dikatakan sesuatu yang terjadi sebagai akibat dari faktor-faktor yang dijelaskan di atas. Tentunya akan berdasarkan jenis atom, kalau keadaan ikatan ditunjuk sebagai karakter atom, pada kesatuannya sebagai karakter mikro, dan yang disebabkan cacat permukaan, keadaan akhir dan bentuk sebagai karakter makro, maka jelaslah bahwa sifat-sifat bahan ditentukan oleh penghimpunan dari semua karakter tersebut. Suatu cara studi untuk mengetahui sifat bahan ditinjau dari sudut tersebut dinamakan karakterisasi, yang dapat diamati secara seksama bukan hanya dalam hubungan sederhana terhadap sifat bahan yang dibuat tetapi karakterisasi dari bahan baku, aditif dan bahan antara, sesuai dengan aliran proses pembuatan. Yang disebut pengendalian kualitas, adalah memberikan perhatian terhadap sifat yang menentukan kualitas, untuk menganalisa perubahan sifat tersebut berdasarkan kepada standar kerja dari proses produksi, dan tercerminkan dalam pengendalian standar kerja. Dengan kata lain, analisa dan kendali adalah terhadap faktor luar, sedangkan karakterisasi adalah analisa dan kendali terhadap faktor dalam. Ini adalah alasan mengapa bahan diperhatikan dari sudut pendangan ilmu bahan walaupun bahan menjadi urusan bidang teknik.

BAGIAN I

KONSEP DASAR

1 PENGUJIAN DAN EVALUASI BAHAN INDUSTRI

Sifat-sifat khas bahan industri perlu dikenal secara baik karena bahan tersebut dipergunakan untuk berbagai macam keperluan dalam berbagai keadaan. Sifat-sifat bahan yang diinginkan sangat banyak, termasuk: sifat-sifat mekanik (kekuatan, kekerasan, kekakuan, keliatan, keuletan, kepekaan takikan atau kekuatan impak dsb), sifat-sifat listrik (hantaran listrik dielektrisitas, dsb) sifat-sifat magnet (permeabilitas, koersivitas, histrisis, dsb), sifat-sifat termal (panas jenis, pemuaian, konduktivitas, dsb), sifat-sifat kimia (reaksi kimia, kombinasi, segregasi, ketahanan korosi, dsb), sifat-sifat fisik (ukuran, masa jenis, struktur dsb.), sifat-sifat teknologi (mampu mesin, mampu keras dsb) dan masih banyak lainnya. Kebanyakan sifat-sifat tersebut ditentukan oleh jenis dan perbandingan atom yang membentuk bahan, yaitu unsur dan komposisinya. Sebagai contoh, kadar suatu unsur yang sangat rendah terabaikan dalam suatu ketakmurnian bahan memberikan pengaruh terhadap sifat-sifatnya, sifat-sifat mekanik yaitu kekuatannya demikian juga sifat ketahanan korosi termasuk reaksi kimianya, dipengaruhi oleh adanya sedikit ketakmurnian, inklusi atau cacat mikro. Sifat tersebut dinamakan struktur. Pembahasan yang didahulukan mengenai metoda dan evaluasi pengujian sifat-sifat mekanik.

1.1 Pengujian tarik statik

Deformasi bahan disebabkan oleh beban tarik statik adalah dasar dari pengujian-pengujian dan studi mengenai kekuatan bahan, hal ini disebabkan beberapa alasan:

1) Mudah dilakukan
2) Menghasilkan tegangan uniform pada penampang
3) Kebanyakan bahan mempunyai kelemahan untuk menerima beban tegangan tarik yang uniform pada penampang. Evaluasi di bagian yang aman masih mungkin.

Maka dalam pengujian bahan industri, kekuatan adalah paling sering ditentukan oleh penarikan statik.

Untuk memberikan evaluasi secara industri terhadap bahan-bahan, setiap negara menentukan batang uji sesuai dengan standar yang ada di negara tersebut. Penentuan tersebut tidak dilakukan dalam penelitian, kecuali karena alasan penggunaan praktis maka batang uji standard industri dapat dipakai.

1.1.1 Daerah elastik

Gb. 1.1 menunjukkan keadaan apabila beban yang diberikan kepada batang uji. Deformasi tak berubah pada pembebanan. Daerah tegangan yang tidak meninggalkan deformasi apabila beban dihilangkan disebut daerah elastik.

Hubungan antara tegangan dan regangan pada beban tarik ditentukan sebagai berikut. Apabila beban P, luas penampang A dan tegangan σ maka:

Gb. 1.1 Deformasi disebabkan oleh beban tarik, $\delta_1 = l - l_0$

$$P = \sigma A \text{ atau } \sigma = \frac{P}{A} \tag{1.1}$$

dan dinyatakan dalam satuan N/m^2, MPa atau kgf/mm^2. Regangan dinyatakan sebagai:

$$\varepsilon = \frac{\delta_l}{l_0} \tag{1.2}$$

Di mana δ_l adalah deformasi dan l_0 panjang asal, maka ε dinyatakan dalam m/m atau mm/mm bilangan tak berdimensi atau sering dinyatakan dalam persen. Deformasi di daerah elastik menunjukkan sifat proporsional atau sebanding lurus dengan tegangan. Hubungan lurus ini disebut modulus elastik, dan dalam hal deformasi tarik disebut modulus elastik memanjang atau Modulus Young yang dinyatakan dengan E,

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \tag{1.3}$$

satuannya sama dengan tegangan.

Seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.1, apabila deformasi terjadi memanjang, terjadi pula deformasi penyusutan yang melintang. Kalau regangan ini ε_r, perbandingannya dengan ε_l disebut perbandingan Poisson, dinyatakan dengan ν,

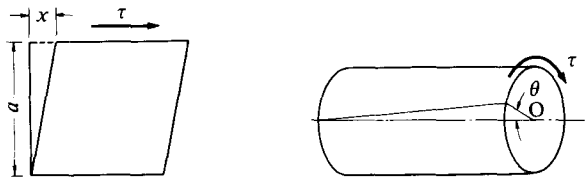
$$\nu = \varepsilon_r / \varepsilon_l \tag{1.4}$$

Dalam kenyataan, harga ν bagi bahan berkristal seperti logam kira-kira 1/3, dapat ditentukan dengan perhitungan terperinci dari hubungan antara konfigurasi atom dan arah tegangan.*

Apabila batang uji panjangnya l dan luas penampangnya $a \times b$ menerima deformasi elastik karena tarikan, volumenya menjadi $V_1 = V + \Delta V$, maka

$$\begin{aligned} V_1 &= (l + \varepsilon_l \cdot l)(a - \nu \cdot \varepsilon_l \cdot a)(b - \nu\, \varepsilon_l b) \\ &= V\{1 + \varepsilon_l(1 - 2\nu) + \varepsilon_l^2(\nu^2 - 2\nu) + \nu^2 \cdot \varepsilon_l^3\} \end{aligned} \tag{1.5}$$

*Modulus elastik bahan-bahan tertentu ditunjukkan pada tabel lampiran.



(a) Geser (b) Puntir

Gb. 1.2 Regangan geser.

di mana, regangan di daerah elastik ε_l kira-kira 10^{-3} adalah kecil dan dapat diabaikan, sehingga kwadrat dan pangkat tiganya dapat dihilangkan, maka:

$$\frac{\Delta V}{V}=(V_1-V)/V=\varepsilon_l(1-2\nu)=K \tag{1.6}$$

K disebut modulus elastik bulk. Kalau $\nu=1/3$ maka $K=\varepsilon_l/3$, yang artinya bahwa dalam deformasi elastik volume mengembang.

Cara pembebanan tidak terbatas pada tarikan sederhana tetapi juga seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.2 yaitu geseran dan puntiran. Dalam hal geseran, regangan γ mempunyai hubungan dengan tegangan geser τ yaitu

$$\tau=\mu/\gamma \tag{1.7}$$

di mana μ disebut modulus geser atau modulus kekakuan. Dalam hal ini berbeda dengan deformasi yang disebabkan tarikan, tidak terjadi perubahan volume

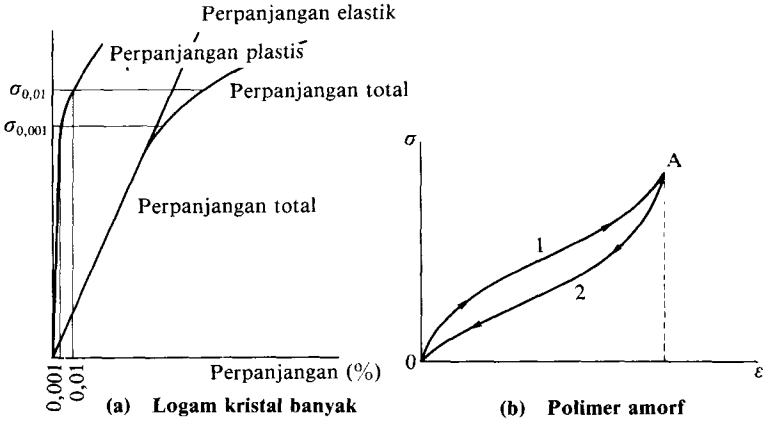
E, ν, K atau μ adalah modulus elastik yang penting dalam bidang teknik. Pada bahan isotropik besaran tersebut tidak ditetapkan secara terpisah tetapi apabila dua sudah tertentu maka yang lainnya tertentu pula. Hubungan tersebut dinyatakan pada Tabel 1.1

Suatu modulus elastik ditentukan oleh gaya antar atom, karena itu dalam hal kristal tunggal dipengaruhi sangat oleh arah konfirgurasi atom, tetapi sukar

Tabel 1.1 Koefisien elastisitas volume (K) modulus Young (E), modulus kekakuan (μ) dan perbandingan Poisson (ν) dari benda padat isotropik.

Koefisien yang didapat	Koefisien diberikan					
	K,E	K,μ	K,ν	E,ν	E,μ	μ,ν
K				$\frac{E}{3(3\mu-E)}$	$\frac{E}{3(1-2\nu)}$	$\frac{2}{3}\mu\left(\frac{1+\nu}{1-2\nu}\right)$
E		$\frac{9K\mu}{3K+\mu}$	$3K(1-2\nu)$			$2\mu(1+\nu)$
μ	$\frac{3KE}{9K-E}$		$\frac{3}{2}K\frac{(1-2\nu)}{(1+\nu)}$		$\frac{E}{2(1+\nu)}$	
ν	$\frac{1}{2}-\frac{E}{6K}$	$\frac{1}{2}\left(\frac{3K-2\mu}{3K+\mu}\right)$		$\frac{E}{2\mu}-1$		

Catatan: Perbandingan (ν) adalah 0,25–0,45, dan $0{,}66E\leq K\leq 3{,}5E$
Poisson $0{,}36E\leq\mu\leq 0{,}40E$
Harga ini biasanya: of $\nu=0{,}33$, dan $K\fallingdotseq E$, $\mu\fallingdotseq(3/8)E$.



Gb. 1.3 Kurva tegangan-regangan di daerah elastis.

dipengaruhi oleh cacat dan ketakmurnian. Kalau dilihat hanya dari antar-aksi dua atom logam, diameter rata-rata dari atom kira-kira 3×10^{-10} m. dan gaya antar atom biasanya 10^{-4} N, $10^{-4}/(3\times10^{-10})^2 \fallingdotseq 10^{15}$ N/m^2, seharusnya dalam orde 100 GPa.

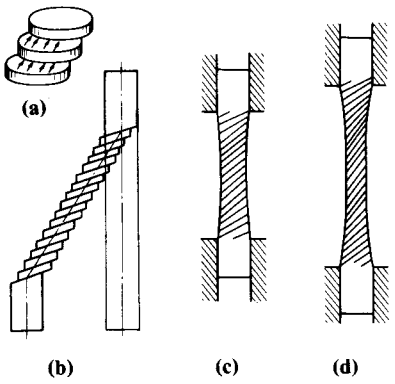
Gb. 1.3 menunjukkan hubungan antara tegangan dan regangan dalam daerah elastik mempergunakan karet sebagai model dari bahan amorf dan logam polikristal sebagai model dari bahan berkristal. Pada logam, daerah elastik dinyatakan oleh bagian lurus dari hubungan tersebut dan gradiennya sebagai modulus elastik. Secara teknik batas daerah tersebut ditentukan oleh regangan sisa apabila beban ditiadakan seperti ditunjukkan dalam gambar. Harga ini dinamakan batas elastik. Beberapa dari bahan amorf mempunyai perpanjangan elastik yang besar. Alasannya mengapa gradien kurva ini berubah dalam daerah tegangan, ialah bahwa molekul rantai yang panjang saling terkait dan cara pembebasannya berbeda satu sama lain.

1.1.2 Mulur

Apabila diberikan suatu tegangan melampaui batas elastik, maka perpanjangan permanen terjadi pada batang uji tersebut. Perpanjangan tersebut dinamakan deformasi plastis, dan tegangan terendah di mana deformasi plastis terjadi disebut **tegangan mulur**. Mulur terjadi sangat berbeda antara bahan berkristal dan bahan amorf. Ada berbagai mekanisma di dalam kristal. Dua unsur mulur yang utama dalam kristal adalah pergeseran (*slip*) dan kembaran (*twin*).

(1) Slip

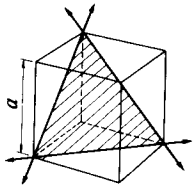
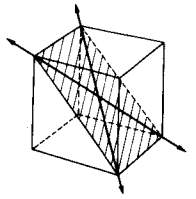
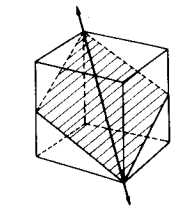
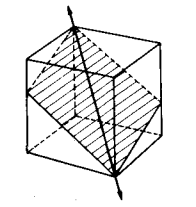
Paling sering teramati bahwa slip merupakan deformasi plastis. Gb. 1.4 memperlihatkan suatu contoh penarikan kristal tunggal. Dalam gambar tersebut, (c) dan (d) menyatakan batang uji yang sedang mengalami pengujian tarik. Walaupun sebagian batang uji yang dekat pada pemegang menunjukkan ketidak tentuan karena tidak bebas, tetapi bagian tengahnya hampir idial, seperti dinyatakan pada (c). Kristal tunggal berdeformasi oleh slip ditunjukkan pada (a) dalam arah menurut konfigurasi spesifik dari atom-atom pada bidang kristal tertentu yang tergantung pada jenis kristal. Slip selalu terjadi dalam arah yang dipadati atom lebih banyak. Bidang slip adalah bidang yang paling banyak dipadati atom atau bidang berikutnya yang agak kurang dipadati atom. Tabel 1.2 menunjukkan bidang slip, arah slip, kepadatan



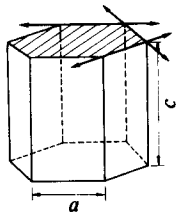
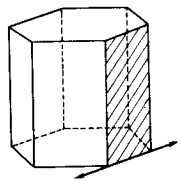
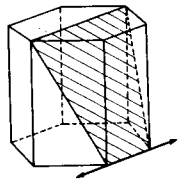
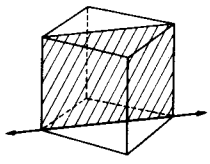
(a) **Bidang slip dan arah slip**
(b) **Deformasi ideal**
(c),(d) **Deformasi ditahan oleh pemegang pada mesin tarik.**

Gb. 1.4 Deformasi kristal tunggal oleh tarikan.

Tabel 1.2 Sistim slip pada kristal utama.

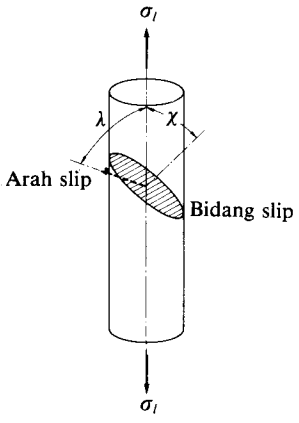
Struktur kristal		Sistim slip			Bidang slip		
		Bidang slip	Arah slip	Jumlah	Kerapatan atom	Jarak bidang	
fcc Fe gama Cu Al, Ni, Au, Ag·····		111	110	4×3=12	$4/\sqrt{3}\,a^2$	$a/\sqrt{3}$	
bcc	besi alfa Fe, W Mo, Kuningan beta ····· ·····	110	111	6×2=12	$\sqrt{2}/a^2$	$a/\sqrt{2}$	
	besi alfa Fe Mo, W, Na ····· ·····	211	111	12×1=12	$\sqrt{2}/\sqrt{3}\,a^2$	$a/\sqrt{6}$	
	besi alfa Fe K	321	111	24×1=24	$\sqrt{2}/\sqrt{7}\,a^2$	$a/\sqrt{14}$	

Tabel 1.2 (sambungan).

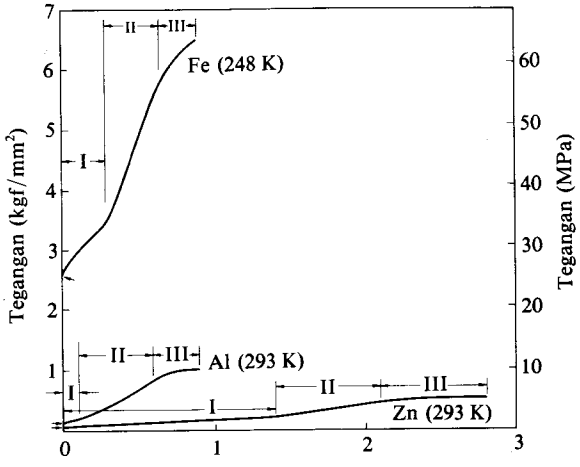
Struktur kirstal		Sistim slip			Bidang slip		
		Bidang slip	Arah slip	Jumlah	Kerapatan atom	Jarak Bidang	
hcp	Cd, Zn, Mg, Ti Be	(0001)	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	$1\times3=3$	$\frac{\sqrt{3}\,a}{2}$ $\left(\frac{4}{\sqrt{3}\,a^2}\right)$	$\frac{2}{c}$ (c)	
	Ti	$\{10\bar{1}0\}$	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	$6\times1=6$	$\frac{1}{ac}\left(\frac{2}{ac}\right)$	$\frac{2}{\sqrt{3}\,a^2}$	
	Ti, Mg	$\{10\bar{1}1\}$	$\langle 11\bar{2}0\rangle$	$6\times1=6$	$\frac{4}{a(3a^2+4c^2)^{1/2}}$	$\frac{ac\sqrt{3}}{(3a^2+4c^2)^{1/2}}$	
Kubus NaCl, AgCl		$\{110\}$	$\langle 1\bar{1}0\rangle$	$6\times1=6$	$1/2\,a^2$	$\frac{2}{\sqrt{2}}a$	

atom pada bidang slip dan jarak bidang slip. Bidang dengan kepadatan atom yang lebih tinggi mempunyai jarak yang lebih besar, dan arah yang mempunyai kepadatan atom lebih besar menunjukkan slip paling sedikit, jadi dalam menelaah deformasi karena geseran pada Gb. 1.2, a besar dan x kecil, yang berarti bahwa regangan geser-nya kecil.

Karena deformasi terjadi pada bidang tertentu ke arah tertentu pula, tegangan dan deformasi seharusnya didapat dari harga-harga pada arah tersebut. Tetapi hal tersebut agak rumit, dan seperti diketahui dari Gb. 1.4, karena bertambahnya defor-masi kristal-kristal berputar pada arah sumbu tarik, jadi orientasi berubah seketika. Tegangan mulur dengan mudah bisa diperoleh. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.5, mempunyai tegangan pada arah tarikan σ_l, luas penampang kristal A,



Gb. 1.5 Hubungan antara bidang slip dan arah slip untuk mendapat tegangan.



Gb. 1.6 Kurva tegangan-regangan untuk kristal tunggal Fe(*bcc*); Al(*fcc*) dan Zn(*hcp*).

$$\sigma_l = P/A \tag{1.8}$$

dan sudut antara garis normal slip dengan sumbu tarikan ialah χ, dan sudut antara arah slip dengan sumbu tarikan λ, maka tegangan geser terurai pada arah slip adalah*:

$$\tau = \sigma_l \cos\chi \cos\lambda \tag{1.9}$$

jadi apabila harga tersebut mencapai batasnya maka slip akan terjadi.

Menurut Schmidt kekuatan mulur berbanding terbalik dengan $\sin\chi \cos\lambda$, karena itu faktor orientasi M adalah tertentu yaitu:

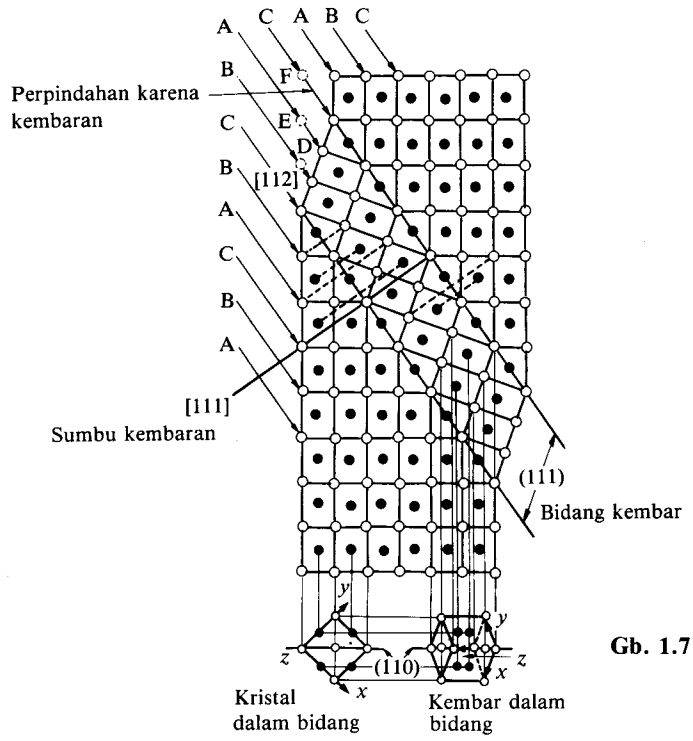
$$M = \cos\chi \cos\lambda \tag{1.10}$$

yang disebut faktor Schmidt. Tegangan geser yang memulai slip disebut tegangan terurai kristal (*critical resolved shear stress*). Tegangan ini dinyatakan dengan panah dalam Gb. 1.6

Gb. 1.6 menunjukkan kurva tegangan-regangan dari tiga macam logam berkristal tunggal. Setiap kurva terbagi atas tiga tahap deformasi, yaitu tahap pertama, tahap kedua dan tadap ketiga, berturutan mulai dari tegangan terendah dan seterusnya. Tahap pertama adalah daerah dengan deformasi ideal ditunjukkan dalam Gb. 1.4, dan Zn (*hcp*) mempunyai suatu daerah yang sangat luas dengan jumlah bidang slip yang kecil. Tahap kedua adalah daerah di mana deformasi berlanjut dengan dua sistim slip menunjukkan pengerasan regangan yang paling besar. Tahap ke tiga adalah daerah di mana banyak sitim slip bekerja seperti halnya pada kristal banyak, menunjukkan bentuk parabola.

Kristal tunggal bukanlah suatu bahan industri mengingat kekuatannya yang rendah, tetapi banyak studi dilakukan sekedar perhatian yang bersifat ilmu pengetahuan saja. Akan tetapi karena kristal tunggal tahan melar (*creep*) pada temperatur tinggi: maka kristal tunggal paduan tinggi untuk sudu turbin telah dikembangkan untuk dapat dipakai secara praktis, yang sifat-sifat dasarnya telah dijelaskan.

*Luas bidang slip adalah $A/\cos\chi$, jadi tegangan yang bekerja pada bidang ini $\sigma_l/(A/\cos\chi)$.



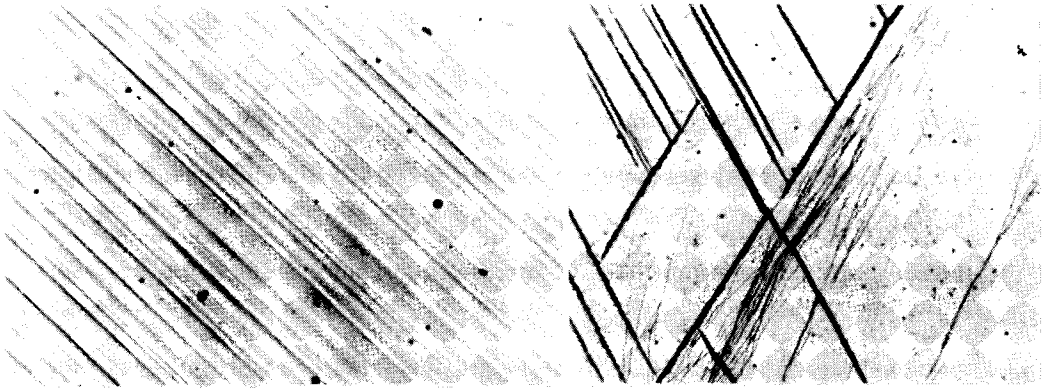
Gb. 1.7 Deformasi kembaran kristal *fcc*. Sifat khas bayangan cermin kristal kembar pada bidang kembaran.

(2) Kembar

Kembaran (*twinning*) merupakan mekanisma mulur yang lain di dalam bahan logam. Satu bagian perpindahan di dalam kristal seperti ditunjukkan pada Gb. 1.7 disebut kembar yang dihasilkan kalau slip sukar terjadi. Kristal hcp mempunyai bidang geser sedikit, jadi tergantung pada arah tarikan mulai terjadi kembaran sejak permulaan. Umumnya karena tegangan yang menyebabkan kembaran lebih besar dari pada tegangan yang diperlukan untuk slip di dalam kristal di mana tegangan mulur bertambah pada temperatur rendah, kadang-kadang kembaran mendahului slip deformasi temperatur rendah. Karena kristal *fcc* menunjukkan peningkatan tegangan yang sangat yang diperlukan untuk slip pada temperatur rendah yang akan dijelaskan kemudian maka kembaran mudah terjadi pada deformasi temperatur rendah. karena kristal fcc menunjukkan peningkatan tegangan slip yang kurang pada temperatur rendah, kembaran sukar terjadi. Tetapi dengan tembaga atau lainnya, kembaran sering ditemukan pada temperatur rendah sekali seperti pada temperatur helium cair (4,2 K).

Pada bagian kembaran, menunjukkan orientasi yang berbeda dari kristal sekelilingnya, karena itu dapat diamati walaupun setelah dipolis dan diets ulang. Tidak ada perubahan orientasi kristal pada slip, tetapi dapat terjadinya tangga pada permukaan, yang tidak terlihat setelah pemolisan ulang. Gb. 1.8 menunjukkan perbedaan antara slip dan kembaran. Gambar (a) menyatakan garis slip terjadi pada permukaan aluminium (*fcc*) yang dipolis, dan (b) menyatakan kembaran terjadi oleh deformasi Fe (*bcc*) pada 196 K.

Dari contoh di atas, kembaran terjadi oleh deformasi dan juga oleh pelunakan. Yang pertama disebut kembaran deformasi dan yang kedua disebut kembaran pelunakan. Tabel 1.3 menunjukkan unsur kembaran dalam kristal utama. Di samping itu, Gb. 1.9 menunjukkan contoh hubungan tegangan-regangan dalam deformasi karena kembaran pada Fe. Kembaran merupakan deformasi tiba-tiba, di mana

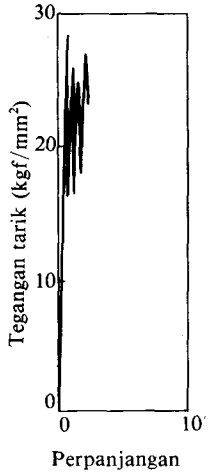


(a) (b)

Gb. 1.8 Slip dan kembar pada permukaan kristal.
(a) Garis slip pada aluminium akibat dideformasi pada temperatur kamar (×50).
(b) Deformasi kembar akibat deformasi kecepatan tinggi pada Fe pada 196 K. Garis bergelombang adalah garis slip akibat deformasi pada temperatur kamar setelah kembaran (×150).

Tabel 1.3 Unsur kembar.

Struktur kristal	Bidang kembar	Arah kembar	Regangan geser kembaran
fcc	(111)	[112]	0,707
bcc	(112)	[111]	0,707
hcp	(10$\bar{1}$2)	[10$\bar{1}\bar{1}$]	Cd 0,171 Zn 0,139 Mg 0,129 Ti 0,189 Be 0,119



Gb. 1.9 Kurva tegangan-regangan disebabkan deformasi kembar pada besi murni 77 K, [001] arah kristal tunggal, tarikan statik.

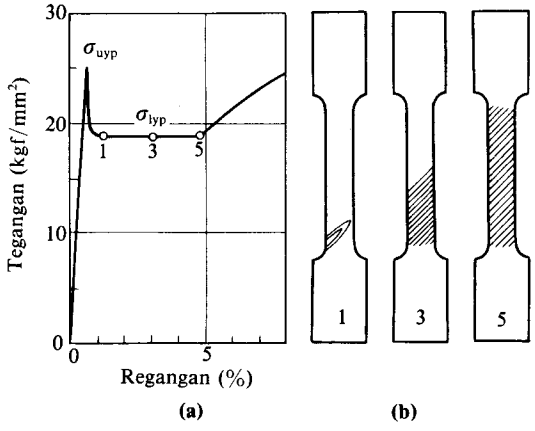
sebagian kristal berubah orientasinya, kekhasannya ditunjukkan pada kurva tegangan-regangan dengan bagian ketidak teraturan turun naik.

(3) Mulur tak kontinu

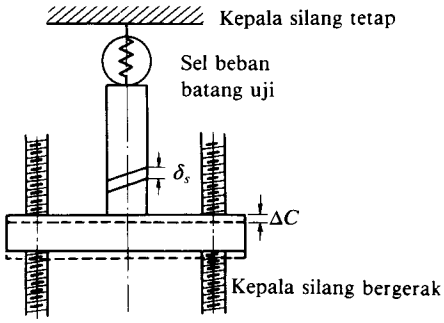
Mulur terjadi secara tak kontinu pada baja sampai baja karbon medium, logam bcc yang mengandung ketakmurnian seperti C, N, dst, dan berbagai paduan seperti Al-Mg, Al-Cu, Al-Li, Cu-Zn, dst. Hal tersebut terjadi pada kristal tunggal dan kristal banyak yang disebut mulur tak kontinu. Kalau deformasi slip pada batang uji terjadi secara tak kontinu, maka deformasi itu disebut deformasi Lueders. Cara terjadinya deformasi tersebut ditunjukkan dalam Gb. 1.10. Kalau sampai pada tegangan mulur atas (σ_{uyp}) deformasi Lueders (juga disebut pita Lueders) terjadi pada satu ujung batang uji yang secara perlahan-lahan dilanjutkan ke seluruh bagian yang sejajar dari batang uji. Perpindahan pita Lueders 1-5 karena terdeformasi pada tegangan tertentu.

Kalau mulur menurun, maka berubah menjadi deformasi Lueders. hal ini terjadi kalau deformasi kristal yang mengandung dislokasi yang dapat bergerak melalui cacat kisi asalnya sedikit. Alasan yang paling penting adalah bahwa masing-masing dari contoh paduan di atas mengandung unsur paduan atau atom-atom ketakmurnian yang ukurannya lebih besar dari atom-atom matriks, yang menghalangi pergerakan dislokasi. Bagi paduan tersebut diperlukan tegangan lebih tinggi agar mulur bisa terjadi, jadi dislokasi yang dapat bergerak terjadi pada pundak dari bagian paralel batang uji di mana terjadi konsentari tegangan yang besar atau pada bagian lain di mana terjadi konsentrasi tegangan karena inklusi yang tertumpuk pada batas butir dan seterusnya, dan deformasi diteruskan ke bagian yang belum terdeformasikan oleh konsentrasi tegangan, maka deformasi berlanjut menjadi deformasi berulang dan cepat.

Gb. 1.11 menunjukkan sekema mesin tarik hasil perkembangan terakhir. Yang



Gb. 1.10 Perkembangan deformasi Lueders.
(a) Kurva tegangan-regangan besi murni.
(b) Perambatan deformasi Leuders (daerah bergaris-garis), pada permukaan batang uji dengan regangan 1-5 pada batas mulur.



Gb. 1.11 Garis besar cara kerja mesin tarik.

dipakai untuk mengetahui sifat-sifat bahan secara teliti pada baja deformasi yang ditentukan. Kepala silang bergerak pada kecepatan tetap yang terkendali. Sel beban dibuat dari batang yang elastis di mana ditempelkan pengukur regangan (*strain gauge*) untuk dapat mencatat pergerakan meskipun sangat kecil. Pergerakan kepala silang yang sesuai ΔC adalah:

$$\Delta C = V\Delta t \tag{1.11}$$

di mana V adalah kecepatan tetap kepala silang dan Δt adalah fraksi waktu. Kalau perpanjangan batang uji δ_s, maka:

$$\Delta C = \delta_s + (\Delta P/R_m) \tag{1.12}$$

di mana ΔP adalah perubahan beban, R_m adalah kekakuan seluruh sistim termasuk batang uji, jadi dengan kekakuan sel beban R_L, kekakuan berbagai sambungan R_m, dan kekakuan batang uji R_s, maka dapat dinyatakan:

$$1/R_m = \left(\frac{1}{R_L}\right) + \left(\frac{1}{R'_m}\right) + \left(\frac{1}{R_s}\right)$$

Karena itu,

$$V\Delta t - \delta_s = (\Delta P/R_m) \tag{1.13}$$

Selanjutnya, kalau pada bagian batang uji sepanjang l_1, pita Lueders terinduksi pada kecepatan v_1,

$$\delta_s = l_1 e_1,\ \Delta t = (l_1/v_1) \tag{1.14}$$

karena itu

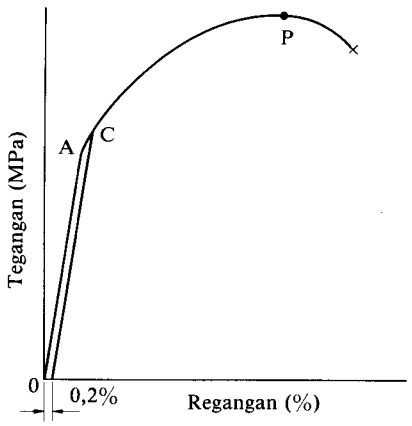
$$\Delta P = R_m l_1\{(V/v_1) - e_1\} \tag{1.15}$$

Karena l_1, e_1 dan v_1 adalah harga yang bisa diukur atau bisa ditentukan, maka turunnya mulur ΔP, yaitu sebesar $\sigma_{nyp} - \sigma_{lyp}$ dalam Gb. 1.10 dapat ditentukan, harga tersebut menjadi lebih besar kalau kekakuan mesin R_m besar, dan kecepatan kepala silang V lebih besar. Selanjutnya dapat dikatakan bahwa keadaan σ_{lyp} adalah deformasi dengan keadaan di mana besaran-besaran dalam seimbang temasuk V, v_1 dan e_1.

Banyak contoh yang dapat menunjukkan hubungan tegangan-regangan yang menyebabkan tegangan turun serupa dengan keadaan mulur tak kontinu, seperti pada mulur yang berulang dari baja di bagian biru yang getas. transformasi yang terinduksi oleh tegangan, deformasi kembar, dan seterusnya. Yang semuanya terjadi kalau pada sebagain l_1 batang uji, timbul regangan e_1 pada kecepatan v_1, jadi turunnya tegangan dapat diperkirakan dari persamaan (1.15).

(4) Mulur yang kontinu

Pada umunmya mulur terjadi perlahan-lahan secara kontinu yang telah dikemukakan dalam Gb. 1.6 bagi kristal tunggal, yang biasanya terdiri dari tiga tahap deformasi yaitu tahap I–III yang berbeda jelas, itu tegangan mulur mudah didapat. Seperti telah dijelaskan dalam kristal banyak bahwa setelah deformasi elastis langsung ke deformasi tahap II, di mana akan lebih sukar untuk terjadi suatu tegangan mulur. Tegangan mulur yang kontinu ditentukan oleh besarnya regangan sisa yang ditunjukkan caranya pada Gb. 1.12. Kekuatan mulur didapat pada tegangan yang menyebabkan perpanjangan 0,2%. Seperti telah dikemukakan terdahulu, bagian lurus dari kurva, atau modulus elastis, tidak akan berubah karena deformasi plastis, oleh karena itu untuk mendapat tegangan mulur, ukurkan deformasi 0,2% dari titik nol



Gb. 1.12 Hubungan tegangan-regangan pada bahan yang mulur kontinu, dan cara memperoleh kekuatan mulur 0,2%.

pada sumbu regangan, kemudian tarik garis sejajar dengan bagian kurva yang lurus memotong kurva pada titik C, tinggi titik C menyatakan tegangan mulur. Cara ini dinamakan metoda *off set* atau disebut metoda tegangan mulur atau tegangan uji 0,2%.

1.1.3 Pengerasan regangan

Kalau bahan dideformasikan pada temperatur sangat rendah dibandingkan dengan titik cairnya, maka pengerasan terjadi mengikuti deformasinya. Gejala ini dinamakan pengerasan regangan atau pengerasan kerja. Pengerasan regangan terjadi selama pengujian tarik, dan karena regangan bertambah, maka kekuatan mulur, kekuatan tarik dan kekerasannya, meningkat, sedangkan hantaran listrik dan masa jenisnya menurun. Kristal logam mempunyai kekhasan dalam keliatan yang lebih besar dan pengerasan regangan yang luar bisa. Sebagai contoh, kekuatan mulur baja lunak sekitar 180 MPa, yang dapat ditingkatkan sampai kira-kira 900 MPa oleh pengerasan regangan. Hal ini merupakan sesuatu yang berguna.

Tegangan di daerah elastis sampai sekitar titik mulur didapat dengan jalan membagi beban oleh luas penampang asal batang uji, biasa dipakai pada perencanaan mesin-mesin.Tegangan ini dinamakan tegangan teknis atau tegangan nominal. Ketika deformasi bertambah luas penampang batang uji menjadi lebih kecil, maka tegangan dapat dinyatakan dalam tegangan sebenarnya. Kekuatan tarik atau kekuatan maksimum yang dinyatakan dalam tegangan teknis atau tegangan nominal sering dipakai dalam bidang teknik, yaitu kalau tegangan pada ordinat Gb. 1.12 dinyatakan dalam tegangan nominal. Kalau tegangan dinyatakan dalam tegangan sebenarnya σ' dan regangan dalam regangan sebenarnya ε',

$$\varepsilon' = \ln (l/l_0) \tag{1.16}$$

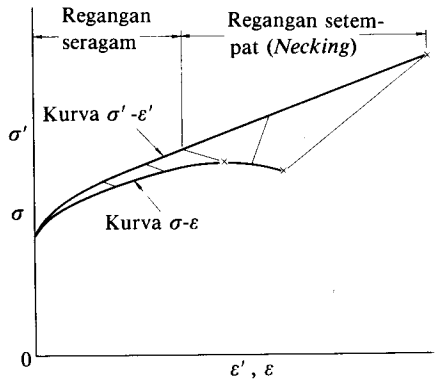
dan dengan regangan teknis ε

$$\varepsilon' = \ln (1+\varepsilon) \tag{1.17}$$

Hubungan antara tegangan sebenarnya dan regangan sebenarnya didekati oelh persamaan

$$\sigma' = F\varepsilon'^{\,n} \tag{1.18}$$

di mana, n dinamakan eksponen pengerasan regangan sebagai ukuran pengerasan, F adalah tegangan pada regangan=1 disebut koefisien kekuatan. F dan n adalah



Gb. 1.13 Tegangan dan regangan teknik, diperbandingkan.

konstanta yang ditentukan oleh macam bahan dan keadaan deformasi tertentu. Gb. 1.13 menyatakan perbandingan antara kurva tegangan-regangan teknis dan kurva tegangan-regangan sebenarnya. Persamaan (1.18) dapat ditulis:

$$\log \sigma' = \log F + n\varepsilon' \tag{1.19}$$

Jadi kalau tegangan sebenarnya dan regangan sebenarnya diplot pada kertas grafik logaritma, daerah deformasi plastis merupakan garis lurus, sedangkan gradiennya merupakan harga n. Kalau keadaan deformasi tertentu diperhitungkan, regangan sebenarnya sama dengan perubahan regangan memanjang dan melintang, atau regangan dari tarikan dan tekanan. Selanjutnya regangan ε'_{neck} pada permulaan pengecilan setempat dari pengujian tarik sama dengan harga n.

1.1.4 Keliatan dan keuletan

Keliatan suatu bahan diinginkan lebih besar, karena makin besar berarti lebih aman terhadap kemungkinan patah, dan lebih mudah untuk diolah melalui pengerolan, penarikan dan seterusnya. Pada umumnya keliatan dinyatakan oleh regangan teknis sampai titik patah dari suatu pengujian tarik. Tabel 1.4 menunjukkan harga keliatan dari bahan-bahan utama.

Di samping itu keuletan bahan menyatakan energi yang diabsorb oleh bahan tersebut sampai pada titik patah, yaitu merupakan luas bidang di bawah kurva tegangan-regangan.

Tabel 1.4 Perbandingan keliatan bahan teknik.

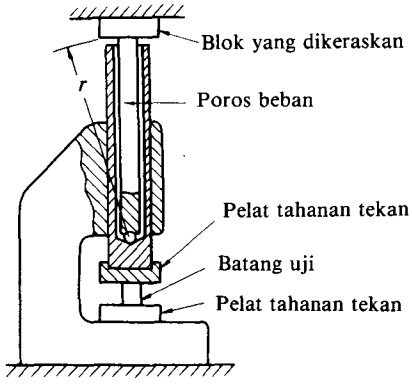
Bahan	Perpanjangan (%) (panjang ukur 50 mm)	Pengecilan luas (%)
Baja Struktur S20C	35	60
Aluminium dianil	25	80
Aluminium paduan 70765 ditemper dituakan.	10	30
Baja struktur Mn-Si	10	20
Akrilik	4	0

1.2 Pengujian statik untuk tekan; bengkok dan puntir

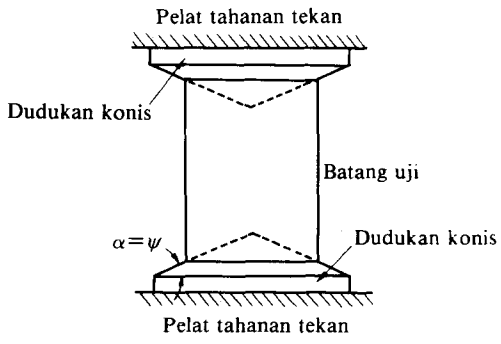
1.2.1 Pengujian tekan statik

Pada umumnya kekuatan tekan lebih tinggi dari kekuatan tarik sehingga pada perencanaan cukup mempergunakan kekuatan tarik. Tetapi kalau suatu komponen hanya menerima beban tekan saja dan dirancang berdasarkan kekuatan tarik saja, kadang-kadang perhitungan menghasilkan dimensi yang berlebihan. Jadi dalam hal tersebut pengujian tekan masih diperlukan.

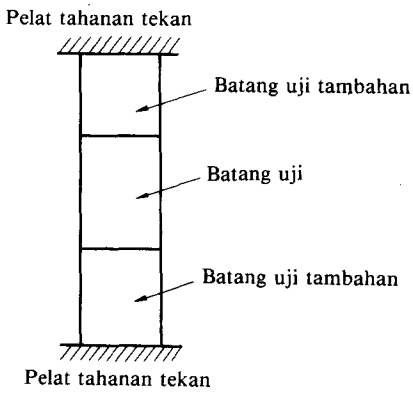
Pada pengujian tekan, apabila ada eksentrisitas, ia akan bertambah besar ketika deformasi berlangsung, maka perlu suatu cara agar tidak terjadi eksentrisitas, jadi hanya bekerja gaya aksial saja. Gb. 1.14 menyatakan cara pengujian tekan yang disarankan oleh ASTM. Selanjutnya tegangan yang tepat sukar didapat karena batang uji berdeformasi menjadi bentuk tong disebabkan adanya gesekan antara landasan dan batang uji atau terjadi tekukan (buckling), karena itu beberapa percobaan dibuat seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.15 dan 1.16. Baru-baru ini diketemukan bahan yang baik terbuat dari keramik sebagai landasan dari silika, yang memberikan pengaruh



Gb. 1.14 Pengujian tekan, disarankan oleh ASTM.



Gb. 1.15 Pelat tekan konis. $\alpha=\psi,\psi$: sudut gesekan.



Gb. 1.16 Pengujian tekan memakai batang uji tambahan.

yang baik. Dalam hal pengujian, kalau pengujian dilakukan pada kecepatan tetap dari kepala silang seperti ditunjukkan pada Gb. 1.11, setidak-tidaknya laju regangan teknis dapat dipertahankan tetap. Dalam pengujian tekan agak sukar mendapatkan laju regangan yang seragam batang uji yang panjang tidak dapat dipergunakan disebabkan mudahnya terjadi tekukan. Maka tersedia kam plastometer mempergunakan kam logaritma.

Pengujian tekan yang cocok untuk bahan getas, yang bersama dengan pengujian bengkok akan diuraikan kemudian. Sebagai titik hancur sangat jelas terlihat bagi bahan getas. Bagi bahan liat keadaan tersebut samasekali tidak terlihat. Dalam hal ini memerlukan manipulasi tertentu untuk melihat adanya retakan pada sisinya, dan hasilnya memberikan perbedaan yang besar.

1.2.2 Pengujian bengkok, lentur statik

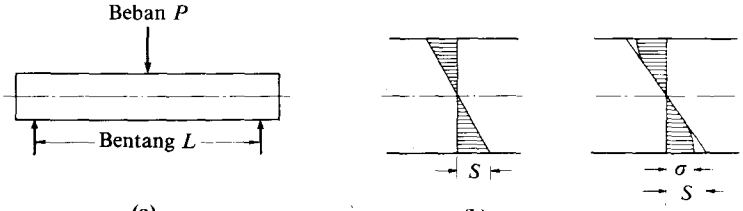
Pengujian bengkok statik adalah salah satu cara pengujian yang dipakai sejak lama bagi bahan yang cocok, karena dapat dilakukan terhadap batang uji berbentuk sederhana dan tidak perlu mempergunakan mesin uji biasa.

Pengujian bengkok dapat dilakukan terhadap bahan getas. Untuk bahan liat dimaksudkan agar dapat menentukan adanya cacat (*flaw*) dan retakan pada permukaan. Demikian juga pada pengujian bengkok dapat menentukan mampu deformasi untuk ukuran tertentu dengan radius bengkok tertentu sampai sudut bengkok tertentu, dengan diberi deformasi tertentu. Cara ini sering dipergunakan untuk menentukan mampu bentuk dari pelat tipis atau kekuatan sambungan las. Tidak perlu mempergunakan mesin penguji. Bahan tipis dapat dibengkokkan dengan memegangnya pada catok dan bahan tebal dapat dibengkokkan dengan mempergunakan dongkrak hidrolik.

Pengujian bengkok bagi bahan keras dan getas adalah cara terbaik untuk menetukan kekuatan dan kegetasan karena alasan berikut: Menurut standar ada beberapa hal bagi besi cor, logam keras, berbagai keramik dan lain sebagainya yaitu,

1) Bentuk batang uji yang sederhana, dapat dibuat terhadap bahan yang sukar diproses secara mekanis.
2) Bentuk batang uji sederhana, agar sukar terjadi cacat yang berupa retakan akibat perlakuan panas atau lainnya.
3) Pada umumnya bahan yang mempunyai kekerasan Brinell lebih dari 600 tidak dapat diuji dengan tarik disebabkan tidak adanya pemegang yang cocok, ketidak sentrisan dan sebagainya.
4) Pada pengujian bengkok dapat diharapkan terjadi patahan yang idial dari bahan yang keras dan getas.

Gb. 1.17 menunjukkan distribusi tegangan pada batang uji yang dibengkokkan. Apabila kurva defleksi-beban hampir lurus, tegangan tarik pada saat patah dapat dihitung dengan mempergunakan rumus elastisitas seperti ditunjukkan dalam gambar (b), yang merupakan tegangan patah yang terjadi. Tetapi apabila kurva defleksi-beban tidak merupakan garis lurus, seperti ditunjukkan pada gambar (c), tegangan S dari persamaan elastisitas tersebut berbeda jauh dari tegangan patah yang terjadi. Dalam hal ini tegangan hasil perhitungan tersebut lebih tinggi dari tegangan yang sebenarnya terjadi. Tabel 1.5 menunjukkan perbandingan kekuatan patah antara hasil uji tarik dan hasil uji bengkok bagi cor. Kekuatan bengkok kira-kira dua kali lebih besar dari pada kekuatan tarik. Karena itu besi cor dipergunakan bukan untuk menahn beban tarik tetapi untuk beban bengkok atau beban tekan sebab bahan akan berukuran terlalu besar kalau didasarkan atas beban tarik.

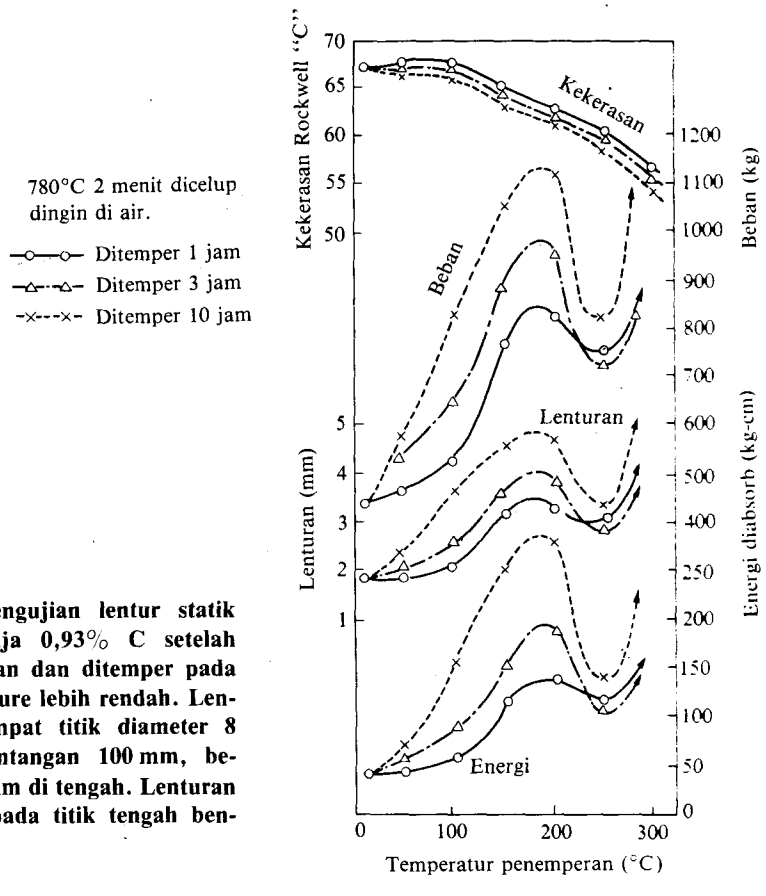


Gb. 1.17

(a) Pengujian lentur
(b) Tegangan pada daerah elastik
(c) Tegangan maksimum pada permukaan melampaui daerah elastik

Tabel 1.5 Kekuatan tarik dan kekuatan lentur besi cor.

Besi cor	Kekuatan lentur (*MPa*)	Kekuatan tarik (*MPa*)	Kekuatan lentur / Kekuatan tarik
1	568	279	2,04
2	782	340	1,87
3	594	308	1,93
4	626	322	1,94



Gb. 1.18 Hasil pengujian lentur statik pada baja 0,93% C setelah dikeraskan dan ditemper pada temperature lebih rendah. Lenturan empat titik diameter 8 mm, bentangan 100 mm, beban 40 mm di tengah. Lenturan diukur pada titik tengah bentangan.

Pengujian bengkok juga berguna menentukan keliatan atau kegetasan bahan getas. Pada umumnya keliatan ditentukan dengan pengujian impak, tetapi sukar untuk melaksanakan pengujian impak bagi bahan getas karena energi yang diserap sangat kecil dan fluktuasinya besar. Gb. 1.18 menunjukkan hasil empat pengujian bengkok dari baja karbon berkadar karbon 0,93% yang dikeraskan dan ditemper pada 523°K. Baja karbon untuk perkakas memerlukan kekerasan yang lebih tinggi, jadi baja tersebut dipergunakan setelah dikeraskan dan ditemper pada temperatur rendah di mana tidak terjadi lagi penurunan kekerasan. Telah diketahui bahwa kekuatan dan keuletan sangat jelas meningkat dengan penemperan kira-kira pada 450°K, tetapi sifat tersebut berubah sebaliknya kalau penemperan melewati 470°K.

Yang perlu diperhatikan pada pengujian kekuatan bagi bahan getas ialah bahwa terjadi fluktuasi tegangan patah yang besar dengan adanya cacat permukaan yang kecil atau adanya inklusi, dan dalam hal tertentu memerlukan pengujian berulang yang banyak untuk mendapat hasil secara statistik.

1.2.3 Pengujian puntir

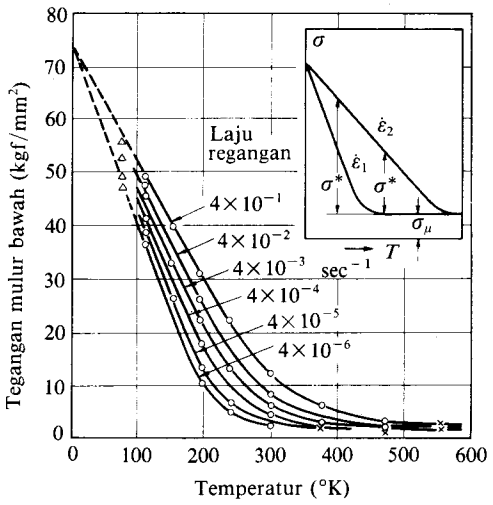
Puntiran adalah satu pembebanan yang penting. Sebagai contoh, kekuatan puntir menjadi permasalahan pada poros-poros. Karena elemen deformasi plastik secara teori adalah slip (geseran) pada bidang slip, modulus kekakuan adalah konstanta yang penting, yang diperoleh dari pengujian puntir (dalam banyak kasus). Deformasi puntiran tidak menunjukkan tegangan uniform pada potongan lintang seperti halnya pada deformasi lenturan. Untuk mendapat deformasi puntiran dengan tegangan yang uniform perlu dipergunakan batang uji berupa silinder tipis.

Patahan karena puntiran dari bahan getas terlihat pada arah kekuatan tarik, yaitu pada 45°C terhadap sumber puntiran, sedangkan bagi bahan yang liat patahan terjadi pada sudut tegak lurus terhadap sumbu puntiran setelah gaya pada arah sumbu terjadi dengan deformasi yang besar, dari hal tersebut sangat mudah menentukan keliatan dan kegetasan.

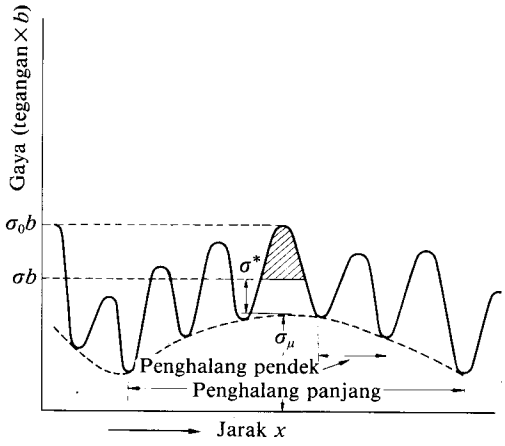
1.3 Pengujian keuletan dan patah ulet

Kelakuan dinamik dari kekuatan logam adalah sangat penting. Ini berarti ada variasi sifat-sifat karena temperatur dan laju regangan. Tentu saja perubahan kekuatan bahan karena temperatur penting pada temperatur tinggi, seperti dinyatakan dalam paragraf kedua berikut, tetapi pada temperatur sekitar temperatur kamar ini berubah sangat, oleh karena itu penting juga dalam pemakaian biasa di sekitar temperatur kamar. Dalam hal ini menimbulkan persoalan serius kalau orang memperluas daerah ekplorasinya ke daerah kutub atau ke ruang angkasa, Kelakuan bahan berbeda pada laju regangan yang tinggi seperti pada temperatur rendah. Contohnya ialah bahwa kekuatan mulur baja lipat dua atau lipat tiga dibandingkan dengan kekuatan pada pembebanan statis kalau laju regangan dinaikkan atau temperatur diturunkan. Bagi bahan ter dan plastik dapat dideformasikan cukup besar dengan pembebanan untuk waktu yang lama, tetapi bahan tersebut akan patah pada pembebanan cepat misalnya dengan pemukulan. Dalam pembebanan statis dapat juga terjadi laju deformasi yang tinggi kalau beban diberi takikan, makin tajam takikan makin besar deformasi yang terkonsentrasikan pada takikan, yang memungkinkan meningkatkan laju regangan beberapa kali lipat.

Dalam daerah temperatur yang rendah di mana bahan sering dipergunakan



Gb. 1.19 Pengaruh laju regangan dalam berbagai temperatur pada tegangan mulur besi murni berkristal tunggal. ○: Tegangan mulur bawah, ×: Tegangan pada batas proporsional, △: Tegangan mulur 0,1%, [100] arah kristal (Takeuchi, T.: J. Phys. Soc. Jap. 21, (1966), 2616).



Gb. 1.20 Penghalang pada pergerakan dislokasi, x adalah jarak pada arah pergerakan dislokasi, b adalah vektor Bergers, σ, σ_μ, σ^* tegangan.

pengaruh laju regangan terhadap tegangan mulur telah dipelajari secara terperinci oleh Takeuchi dengan mempergunakan kristal tunggal besi murni. Hasilnya ditunjukkan dalam Gb. 1.19. Tegangan tarik sangat meningkat pada temperatur rendah, dimulai dari temperatur yang lebih tinggi dalam pengujian dengan laju regangan yang lebih tinggi, masing-masing terpusat menuju ke satu harga tegangan tertentu pada 0°K. Tegangan terpusat ke 0°K adalah tegangan Peierls dari besi yang akan dijelaskan kemudian. Ini adalah tegangan yang diperlukan untuk sekedar menggerakkan dislokasi dalam kisi besi murni tanpa bantuan energi termal. Dapat dikatakan bahwa kalau temperatur meningkat energi termal dari kisi kristal membantu tegangan Pierls, yang menunjukkan tegangan mulur rendah. Gb. 1.20 menyatakan keadaan tersebut. Dislokasi dalam kristal dinyatakan digerakkan pada arah x melalui penghalang berdaerah pendek sebagai bantuan pada penghalang berdaerah panjang. Medan tegangan daerah panjang berkisar sepuluh sampai seratus kali jarak atom di mana energi termal tidak dapat memberikan pengaruh. Tegangan ini adalah σ_μ. Penghalang daerah pendek terjadi pada satu atau beberapa kali jarak atom, yang merupakan tambahan tegangan σ^* untuk dapat melalui puncak penghalang seperti dinyatakan oleh daerah bergaris pada gambar, dengan bantuan getaran termal dari kisi, jadi dislokasi berpindah ke arah x. Dari hasil pengujian Gb. 1.19 tegangan mulur yang didapat.

$$\sigma = \sigma_\mu + \sigma^* \tag{1.20}$$

Telah diketahui bahwa yang utama dari tegangan mulur ialah komponen σ^*. Tegangan σ^* disebut komponen termal dari tegangan mulur dan σ_μ disebut komponen non-termal.

Umumnya persamaan Arhenius ditetapkan antara laju dan temperatur dari reaksi fisik dan kimia sebagai berikut:

$$\dot{\varepsilon}=A\exp(-U/kT) \tag{1.21}$$

Di mana A adalah kostanta, U adalah konstanta yang disebut energi aktivasi ditetapkan oleh sifat alamiah dari reaksi dengan satuannya eV, k adalah konstanta Boltzman[1)] dan T ialah derajat Kelvin. Untuk perpindahan dislokasi sejarak antar atom melalui penghalang berjarak pendek, sebagai keseluruhan, energi aktivasi yang diperlukan adalah U_0. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.20, sebagian dari itu adalah komponen termal σ^* dari tegangan mulur atau energi, energi yang diaktipkan yang diperlukan hanya untuk menyebabkan mulur adalah:

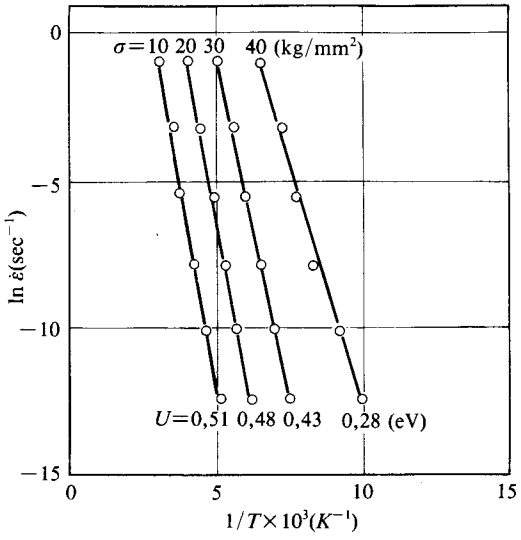
$$U=U_0-f(\sigma^*) \tag{1.22}$$

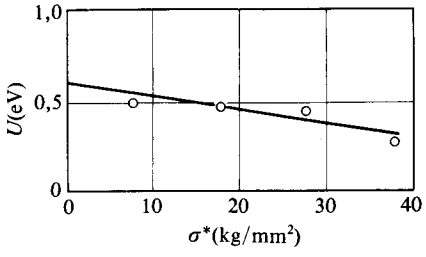
di mana U_0 adalah energi yang diaktipkan tanpa tegangan kerja dan f adalah fungsi dari σ^*.

Dalam persamaan (1.21) logaritma $\dot{\varepsilon}$ dan $1/T$ mempunyai hubungan lurus dan lerengnya (*slope*) menyatakan energi aktivasi. Hubungan di atas pada tegangan tertentu dalam Gb. 1.19 dijelaskan dalam Gb. 1.21. Dalam gambar setiap garis menyatakan harga energi aktivasi U yang didapat dari lereng. Hasil untuk memperoleh hubungan antara U dan σ^* ditunjukkan dalam Gb. 1.22. Hubungan dalam gambar ini dikenal dengan menuliskan kembali persamaan 1.22 sebagai berikut:

$$U=U_0-v^*\sigma^* \tag{1.23}$$

Di mana U_0 adalah luas daerah puncak lebih tinggi dari σ_μ dalam Gb. 1.20, dan harga U pada tegangan nol dari Gb. 1.22, kira-kira 0,62 eV. Selanjutnya lereng garis lurus dalam gambar ini adalah v^*, menjadi $1{,}12\times10^{-22}$ cm^3, tetapi kalau pelipatan vektor Burger dari besi $b=2{,}3\times10^{-8}$ cm dipakai, menjadi kira-kira 8 b^3. Jadi v^* mempunyai





Gb. 1.22 Perubahan energi aktivasi terhadap σ^*, berdasarkan gambar sebelumnya.

Gb. 1.21 Hubungan log $\dot{\varepsilon}$ dengan $1/T$ saat mulur kalau tegangan tak berubah, mempergunakan harga nyata dari Gb. 1.19.

[1)] $k=3{,}30\times10^{-24}$ kal/K/atom$=0{,}863\times10^{-4}$ eV/K/atom

ukuran volume yang disebut volume aktivasi. Energi aktivasi menunjukkan perubahan tidak begitu besar pada berbagai logam tetapi volume aktivasi berbeda besar, kira-kira 10 b^3 dalam logam *bcc* termasuk besi dan paduannya, dan kira-kira 100–1.000 b^3 dalam logam *fcc* dan *hcp*. Dengan v^* lebih kecil, tegangan mulur meningkat sangat kalau temperatur menurun yang menunjukkan dasar sifat khas dari logam *bcc* dan paduannya.

1.3.1 Transisi liat-getas

Beberapa bahan dapat tiba-tiba menjadi getas dan patah karena perubahan temperatur dan laju regangan, walaupun pada dasarnya logam tersebut liat. Gejala ini disebut transisi liat-getas, yang merupakan hal penting ditinjau dari penggunaan praktis bahan. bahan yang dapat memberikan gejala patah getas adalah logam *bcc* seperti Fe, W, Mo, Nb, Ta, dan logam *hcp* seperti Zn serta paduannya, sedangkan bagi logam fcc sama sekali tidak terjadi gejala tersebut. Di samping itu gejala itu dapat mudah terjadi bagi plastik.

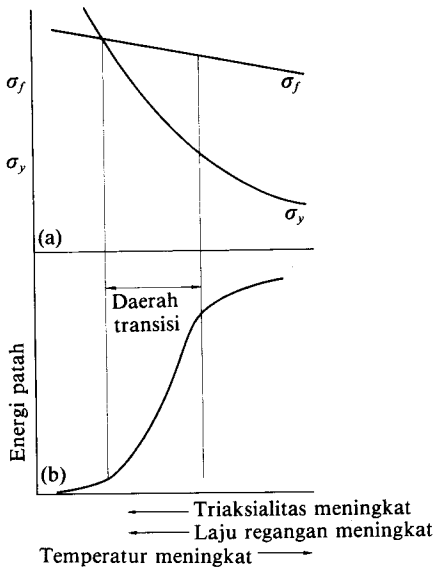
Patahan patah getas bersifat getas sempurna, yaitu tanpa adanya deformasi plastis sama sekali, jadi berbeda dengan bidang slip biasa, patah terjadi pada bidang kristalogarafi spesifik pada bidang pecahan. Permukaan patah dari bidang pecahan mempunyai kilapan yang menunjukkan pola Chevron secara makroskopik dan merupakan pola sungai secara mikroskopik pada arah yang menunju titik permulaan patah. Yang memberikan pengaruh terhadap patahan demikian adalah tiga faktor.

1) Tegangan tiga sumbu: Karena keadaan tegangan menjadi rumit terhadap dua sumbu atau tiga sumbu disebabkan pangkal takikan, terjadi peningkatan yang menyolok dari tegangan mulur, sementara tegangan patah kurang mempengaruhi, dan patah getas mudah terjadi.
2) Laju regangan: Peningkatan tegangan mulur yang sangat ditandai oleh peningkatan laju regangan yang mengakibatkan hasil sama seperti pada 1).
3) Temperatur: Seperti pada 2) terjadi karena temperatur menurun. Makin rendah temperatur makin mudah terjadi patah getas.

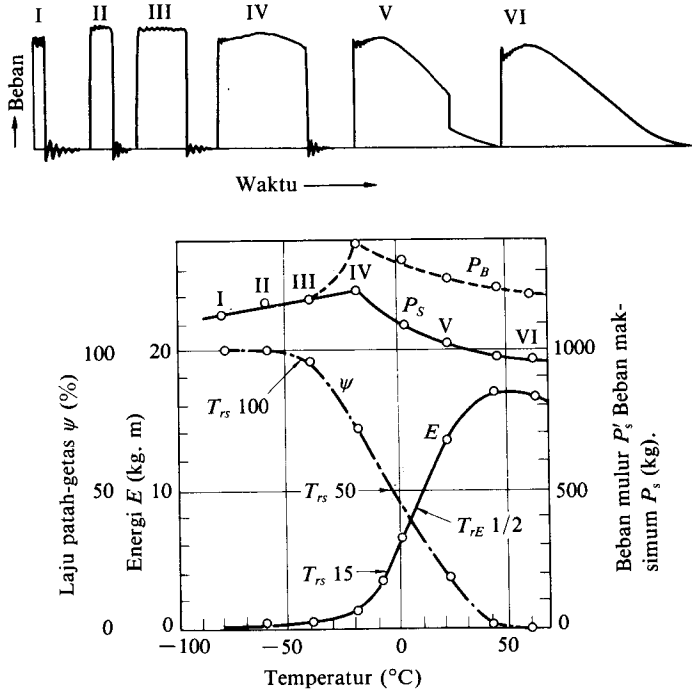
Gb. 1.23 menunjukkan keadaan di atas. Patah getas menjadi permasalahan penting pada besi dan baja dalam tahun 1930-an ketika jembatan-jembatan rusak di berbagai tempat di negara Eropa, dan ketika pipa minyak gas alam rusak di AS antara tahun 1940–1943 ketika kapal-kapal perang patah dan tenggelam di AS. Setelah itu banyak contoh diperoleh mengenai permasalahan tersebut. Untuk menelaah ketahanan terhadap keadaan patah tersebut, lebih dari 100 metoda telah diusulkan, yang sebagian dikemukakan di bawah ini.

(1) Pengujian impak Charpy

Pengujian impak Charpy banyak dipergunakan untuk menentukan kualitas bahan. Batang uji dengan takikan 2 mmV, paling banyak dipakai. Di samping itu lebih dari 30 jenis diusulkan termasuk jenis yang memancing retak lelah. Gb. 1.24 menunjukkan satu dari contoh hasil pengujian dengan mempergunakan batang uji terbuat dari baja lunak dengan takikan 2 mmV. Hasil yang paling penting adalah temperatur transisi, menurut berbagai spesifikasi seperti ditunjukkan dalam gambar. Gambar ini menunjukkan juga contoh khas pada perubahan kurva beban-waktu di setiap temperatur pengujian. Di masa silam, pada pengggunaan bahan, sering menyatakan dengan energi yang diabsorb dan perbandingan patah getas pada satu temperatur yang mendekati temperatur kerja dari komponen mesin yang dipakai, sebagai contoh pada 0°C, hal ini hanya merupakan keuletan (secara eksperimen).



Gb. 1.23 Generalisasi dari veriasi tegangan mulur dan tegangan patah (a), dan kurva transisi liat-getas (b) dengan berbagai faktor.



T_{rs}: Temperatur transisi patah
T_{rE}: Temperatur transisi energi
I-V: Kurva beban-waktu didapat dengan memasang cel beban pada pemukul.

Gb. 1.24 Contoh pengujian Charpy. baja lunak 0,19% C batang uji dengan takikan V 2

Pengujian patah yang umum biasanya ditentukan oleh tegangan yang diperlukan untuk mematahkan, tetapi pada pengujian Charpy adalah energi yang diperlukan untuk mematahkan, jadi dipandang dari sudut ini pengujian Charpy dapat dianggap cara pengujian yang maju.

(2) Pengujian lebar, ukuran besar

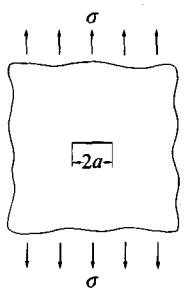
Walaupun kriteria dibuat berdasarkan pada hasil dari pengujian Charpy dengan batang uji yang kecil tetapi patah getas mungkin saja terjadi pada satu konstruksi baja yang berukuran besar.

Maka telah banyak usulan diajukan dengan mempergunakan batang uji yang besar, tetapi pada saat ini belum ada yang secara internasional disyahkan. Dalam metoda ini, pengujian patah dilakukan pada temperatur tetap dengan mempergunakan batang uji selebar 1 m. Pengujian ini memerlukan mesin uji berkapasitas 10.000 ton, yang menyebabkan pengujian tersebut menjadi mahal. Tetapi pengujian ini berguna karena terjadinya patah getas pada struktur yang sebenarmya dimungkinkan dan harga hasil pengujian dapat langsung dipergunakan pada desain sesungguhnya yaitu pembebanan, tegangan, dsb.

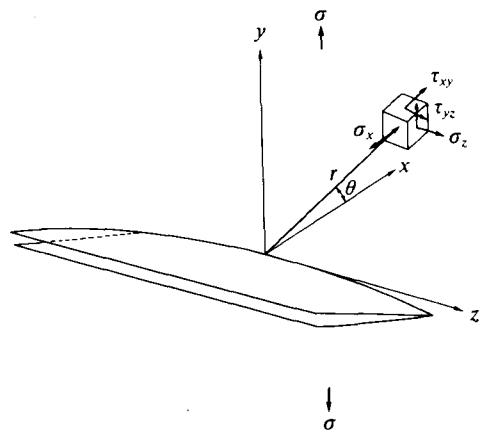
1.3.2 Keuletan patah

Seperti telah diketahui hasil dari pengujian Charpy, patah getas terjadi pada pangkal takikan batang uji, jadi bahan tiba-tiba patah tanpa deformasi plastis. Secara praktis patahan buatan seperti itu tidak pernah terjadi pada struktur mesin, tetapi mesin selalu mempunyai bagian di mana terjadi konsentrasi tegangan dan mungkin mempunyai cacat pada lasan, jadi adanya cacat yang bekerja seperti takikan tidak dapat dihindari.

Oleh karena itu, suatu evaluasi yang menganggap adanya retakan tertentu diperlukan dalam pemilihan bahan. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.25 kalau diumpamakan bahwa melalui retakan sepanjang $2a$ terdapat pada pelat uji yang sangat lebar, dan tegak lurus pada retakan bekerja tegangan σ, faktor intensitas tegangan K ditetapkan dengan persamaan berikut dan diumpamakan merupakan harga yang menyatakan lingkungan dinamik yang memperbesar retakan:



Gb. 1.25 Pelat lebar dengan retakan panjang $2a$.



Gb. 1.26 Tegangan dekat ujung retakan.

$$K=\sigma\sqrt{\pi a} \tag{1.24}$$

Kalau harga K tetap maka gaya untuk memperbesar retakan itu, juga tetap pada setiap perubahan kombinasi dari σ dan a. K dinyatakan dengan satuan Pa $m^{1/2}$ atau kgf $mm^{3/2}$. Karena K untuk menyatakan lingkungan dinamik sekitar retakan, kalau K tak berubah tegangan atau regangan sekitar retakan juga tidak berubah. Pada sumbu koordinat seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.26 tegangan dan regangan yang diberikan kepada elemen mikro pada γ dan θ dijelaskan sebagai berikut:

$$\left.\begin{aligned}
\sigma_x &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\sigma_y &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
\tau_{xy} &= \frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\sin\frac{\theta}{2}\cos\frac{3\theta}{2}
\end{aligned}\right\} \tag{1.25}$$

dan dalam tegangan bidang:

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_z=\tau_{yz}=\tau_{xz}=0\\
&\varepsilon_x=\frac{1}{E}\frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left\{(1-\nu)-(1+\nu)\sin^2\frac{\theta}{2}\right\}\\
&\varepsilon_y=\frac{1}{E}\frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left\{(1-\nu)-(1+\nu)\sin^2\frac{\theta}{2}\right\}\\
&\gamma_{xy}=\frac{1+\nu}{E}\tau_{xy}
\end{aligned}\right\} \tag{1.26}$$

dan dalam regangan bidang:

$$\left.\begin{aligned}
&\sigma_z=\nu(\gamma_x+\gamma_y)\\
&\tau_{yz}=\tau_{xz}=0\\
&\varepsilon_x=\frac{1}{(1+\nu)E}\frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-2\nu-\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
&\varepsilon_y=\frac{1}{(1+\nu)E}\frac{K}{\sqrt{2\pi\gamma}}\cos\frac{\theta}{2}\left(1-2\nu+\sin\frac{\theta}{2}\sin\frac{3\theta}{2}\right)\\
&\gamma_{xy}=\frac{1+\nu}{E}\tau_{xy}
\end{aligned}\right\} \tag{1.27}$$

di mana E adalah modulus Young, ν adalah perbandingan Poisson, ε regangan tarik atau tekan, dan γ adalah regangan geser. Persamaan (1.25)–(1.27) tidak dapat dipakai kecuali untuk daerah sekitar ujung retakan ($\gamma \ll a$). Selanjutnya karena hubungan ini dihitung sebagai benda elastik kontinu, hanya dapat dipergunakan pada sarat elasik , dan kalau mulur terjadi sampai tingkat tertentu tanpa menyimpang dari sarat elastik pada titik retak, ini yang dinamakan mulur ukuran kecil.

Gaya g yang memperbesar retakan ditetapkan berdasarkan perubahan energi yang disimpan dalam benda elastik susuai dengan pertumbuhan retakan, yang berhubungan dengan K yang didapat dari persamaan (1.25)–(1.27) sebagai berikut:

$$\left.\begin{aligned} K^2 &= Eg \text{ (dalam tegangan bidang)} \\ K^2(1-\nu^2) &= Eg \text{ (dalam regangan bidang)} \end{aligned}\right\} \tag{1.28}$$

Kalau g mencapai energi per satuan luas yang diperlukan untuk pertumbuhan retakan, g_C, retakan tidak stabil terjadi karena keadaan energi. Sejalan dengan itu, kalau harga K dan g_C yang membatasi ditentukan, retakan terjadi segera setelah K mencapai K_C, jadi keduanya menyatakan tahanan terhadap retakan dari bahan. K_C dan g_C yang didapat dari pelat cukup tebal, menunjukkan harga yang tetap, spesifik bagi bahan itu, yang memenuhi syarat mulur ukuran kecil, jadi hal ini disebut keuletan retakan regangan bidang K_{IC} dan dipakai sebagai harga standar untuk perencanaan suatu struktur, di mana I menunjukkan retakan dari modus I yang berhubungan dengan kondisi pada Gb. 1.25. Ada juga Modus *II* dan *III* tetapi tidak dipakai di sini.

Pada titik retakan kadang-kadang terjadi deformasi plastis yang cukup besar diikuti dengan patahan yang tidak stabil. Dalam hal ini perpindahan bukaan retakan (C. O. D., Φ) ditetapkan. Dapat ditentukan bahwa kalau Φ mencapai batas Φ_c patahan akan terjadi, dan secara praktis dapat diukur dan dapat dipakai sebagai retakan standar dari bahan yang menunjukkan ketidak linieran. Kalau perhitungan elastik dilanjutkan:

$$\Phi = 8\sigma_s(a/\pi E) \ln \sec(\pi\sigma/2\sigma_s) \tag{1.29}$$

dapat dihasilkan, di mana σ_s merupakan tegangan mulur. Kalau mulur ukuran kecil dipenuhi:

$$\Phi \doteq K^2/\sigma_s E \tag{1.30}$$

di mana K dan g berhubungan. Dalam keadaan ini lebih baik mempergunakan K dan g.

Baru-baru ini telah diusulkan untuk menyatakan kondisi patahan dari benda elastik tak linier dengan integral kurva linier J tidak tergantung pada lintasan, berkenaan dengan energi yang dibutuhkan untuk memperbesar retakan, yang dipergunakan untuk menyatakan lingkungan dinamik terhadap patahan bahan yang tidak memenuhi syarat mulur ukuran kecil. Ini mempunyai pengertian dinamik yang lebih jelas daripada COD (crak opening displacement). Kalau J_{IC} dan Φ_{IC} ditentukan dengan titik patah asal, mereka menjadi konstanta bahan tanpa menerima suatu pengaruh dimensi dari benda uji. Kalau mulur ukuran kecil dipenuhi, tentu saja J_{IC} sama dengan g_{IC}.

Secara percobaan K_{IC} diperoleh sebagai berikut. J_{IC} dan Φ_{IC} diperoleh dengan cara sama. Karena batang uji dipergunakan dua jenis seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.27. Ketebalan pelat B dan panjang retakan a ditetapkan sebagai berikut:

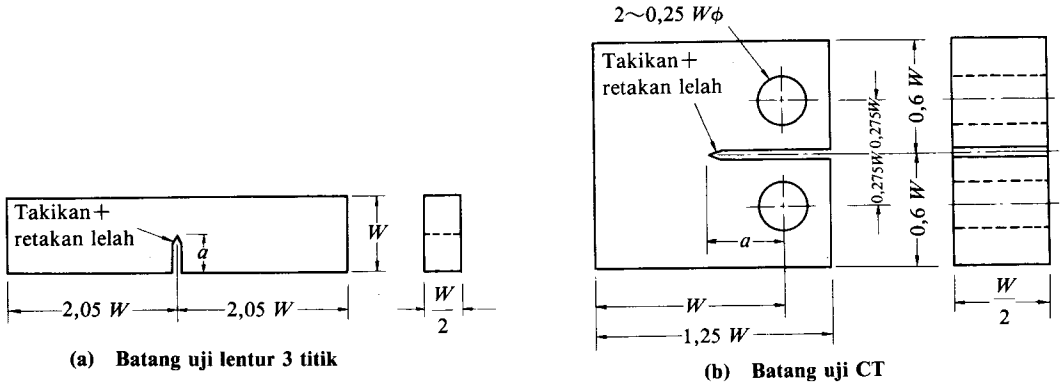
$$B \text{ dan } a \geq 2{,}5(K_{IC}/\sigma_s)^2 \tag{1.31}$$

di mana σ_s adalah tegangan mulur pada temperatur uji.

K_{IC} dihitung dengan persamaan berikut:

$$\left.\begin{aligned} &\text{Pengujian bengkok} \quad K_{IC} = \frac{P_Q}{BW^{3/2}} f(a/w) \\ &\text{Benda uji CT} \qquad\quad K_{IC} = \frac{P_Q}{BW^{1/2}} f(a/w) \end{aligned}\right\} \tag{1.32}$$

di mana P_Q adalah beban pertumbuhan retak, dan s adalah bentangan pengujian bengkok, jadi:



(a) Batang uji lentur 3 titik (b) Batang uji CT

Gb. 1.27 Batang uji patah-ulet (ASTM E 399-78).

Tabel 1.6 Koefisien dalam persamaan (1.33).

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
Pengujian lentur	2,9	−4,6	2,18	37,6	38,7
Batang uji CT	29,6	−185,5	655,7	−1017,0	638,9

$$f(a/w)=C_1(a/w)^{1/2}+C_2(a/w)^{3/2}+C_3(a/w)^{5/2} \\ C_4(a/w)^{7/2}+C_5(a/w)^{9/2} \qquad (1.33)$$

Tabel 1.6 menunjukkan koefisien C_1-C_5 dari persamaan di atas. Contoh dari keuletan patah ini dalam angka dijelaskan terpisah.

1.4 Kekerasan

Pengujian kekerasan adalah satu dari sekian banyak pengujian yang dipakai, karena dapat dilaksanakan pada benda uji yang kecil tanpa kesukaran mengenai spesifikasi.

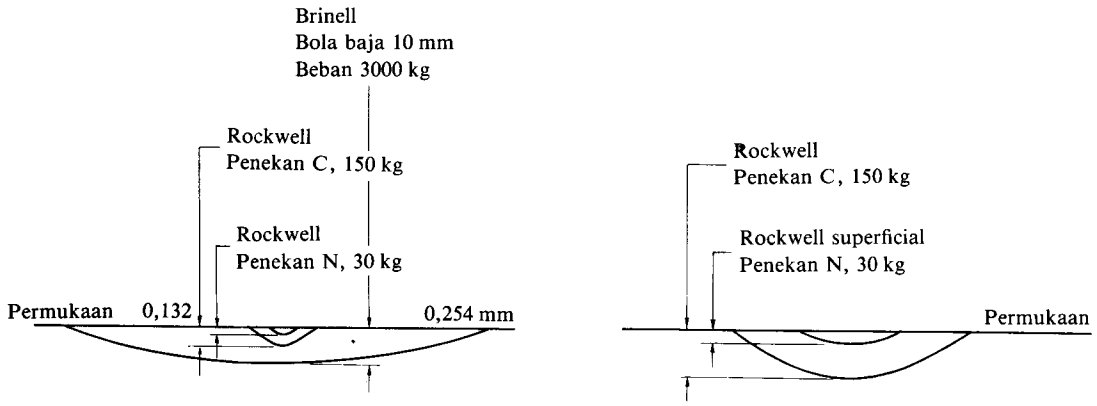
Pengujian yang paling banyak dipakai ialah dengan menekankan penekan tertentu kepada benda uji dengan beban tertentu dan dengan mengukur ukuran bekas penekanan yang terbentuk di atasnya, cara ini dinamakan cara kekerasan penekanan. Selanjutnya ada cara lain dengan menjatuhkan bola dengan ukuran tertentu dari ketinggian tertentu di atas benda uji dan diperoleh tinggi pantulannya. Tabel 1.7 adalah ringkasan berbagai pengujian kekerasan. Pengujian kekerasan Brinell merupakan pengujian standar secara industri, tetapi karena penekannya dibuat dari bola baja yang berukuran besar dengan beban besar, maka bahan lunak atau keras sekali tidak dapat diukur kekerasannya. Pengujian kekerasan Rockwell cocok untuk semua material yang keras dan yang lunak, penggunaannya sederhana dan penekannya dapat dengan leluasa. Tabel 1.8 menunjukkan bagaimana memilih sekala Rockwell. Sekala kekerasan B, C dan A adalah untuk bahan logam, sekala A dapat dipakai untuk bahan sangat keras seperti karbida tungsten, sekala D dan di bawahnya dipakai untuk batu gerinda sampai plastik. Pengujian Rockwell superfisial mempergunakan beban yang ringan untuk memperbaiki ketelitian dari penekan dengan cara penggunaan yang sama, juga dapat mengukur kekerasan permukaan dari bahan yang dikeraskan kulitnya. Gb. 1.28 menunjukkan ukuran perbandingan dari

Tabel 1.7 Karakteristik berbagai pengujian kekerasan.

Cara pengujian	Brinell (H_R)	Rockwell (H_RA, H_RC etc.)	Rockwell superficial (H_R30T, H_R30N dst)	Vickers (H_V)	Kekerasan mikro (H_V)	Shore (H_S)
Penekan	Bola baja 10 mmϕ Karbida	Kerucut intan 120°; Bola baja 1/16″–1/2″	Kerucut intan 120°; Bola baja 1/16″–1/2″	Piramida intan sudut bidang berhadapan 136°	Jenis Vickers Jenis Knoop sudut 130°, 172°	Palu intan 3 g
Beban	500–3,000 kg	Beban mula 10 kg beban total 60,100, 150 kg	Beban mula 3 kg, beban total 15,30 dan 45 kg	1–120 kg	1–500 g	
Kekerasan	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekanan}}$	Dalamnya penekanan	Dalamnya penekanan	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekanan}}$	$\frac{\text{Beban}}{\text{Luas penekanan}}$	Tinggi pantulan 6,5″ dari 10″ tinggi pantulan asal adalah 100

Tabel 1.8 Skala kekerasan Rockwell.

Skala	Penekan	Beban utama	Dial
B	Bola Baja 1/16″	100	Merah
C	Intan	150	Hitam
A	Intan	60	Hitam
D	Intan	100	Hitam
E	Bola baja 1/8″	100	Merah
F	Bola baja 1/16″	60	Merah
G	Bola Baja 1/16″	150	Merah
H	Bola baja 1/8″	60	Merah
K	Bola Baja 1/8″	150	Merah
L	Bola baja 1/4″	60	Merah
M	Bola Baja 1/4″	100	Merah
P	Bola Baja 1/4″	150	Merah
R	Bola Baja 1/2″	60	Merah
S	Bola Baja 1/2″	100	Merah
V	Bola baja 1/2″	150	Merah



Gb. 1.28 Perbandingan dimensi dari penekanan pada berbagai pengujian kekerasan.

penekanan pada pengujian bahan yang sama dengan berbagai pengujian kekerasan.

Dalam pengujian kekerasan, seperti pada pengujian statik lainnya, diukur ketahanan terhadap deformasi. Tetapi ukuran penekan, beban dan ukuran penekanan, derajat pengerasan regangan, berbeda. Jadi pertama korelasi antara kekerasan yang diperoleh dengan berbagai cara pengujian kekerasan menjadi permasalahan.

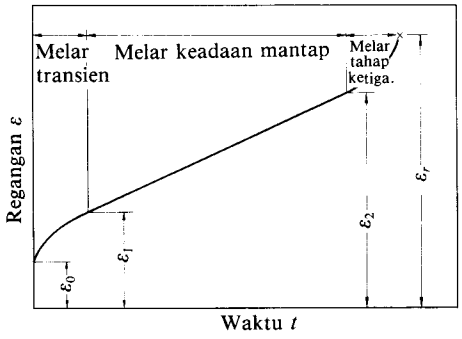
Tidak ada cara lain kecuali mendapat hubungan tersebut secara eksperimen, jadi kekerasan yang diperoleh dengan berbagai cara ditulis sebagai tabel konversi kekerasan. Tetapi hal yang diutarakan di atas berbeda menurut bahan, oleh karena itu untuk baja atau paduan tembaga perlu memakai tabel yang berlainan, sesuai dengan paduan masing-masing.*

Sejumlah data tersedia berkenaan dengan hubungan antara kekerasan dan kekuatan tarik atau kekuatan lelah. Hubungan ini sangat memudahkan penggunaannya untuk mengetahui kekuatan bahan dengan pengujian sederhana dari kekerasan. Tetapi karena hubungan itu memuat banyak faktor variabel, perlu berhati-hati dalam penggunaannya. Sebagai tambahan dalam penggunaan bagi bahan yang sama jenisnya, disarankan untuk memperhatikan metalografinya.

1.5 Melar (*Creep*)

Beberapa bagian dari mesin dan struktur dapat berdeformasi secara kontinu dan perlahan-lahan dalam kurun waktu yang lama apabila dibebani secara tetap. Deformasi macam ini yang tergantung pada waktu dinamakan melar (*creep*). Melar terjadi pada temperatur rendah juga, tetapi yang sangat menyolok terjadi pada temperatur dekat pada titik cair. Kalau kekuatan lelah yang akan dikemukakan kemudian dibandingkan dengan kekuatan melar, kekuatan lelah rendah pada temperatur rendah sedangkan pada temperatur lebih tinggi (sekitar 650°K untuk baja) kekuatan melar lebih rendah. Oleh karena itu pada perencanaan suatu komponen untuk temperatur rendah perlu didasarkan atas kekuatan lelah sedangkan pada temperatur lebih tinggi perlu didasarkan atas kekuatan melar, karena pengaruh waktu pembebanan adalah besar.

Pada temperatur lebih tinggi dari 0,4 kali titik cair dalam derajat Kelvin atau biasanya dinyatakan dengan 0,4 T_M, perubahan regangan melar dengan berjalannya waktu ditunjukkan dalam Gb. 1.29. Kalau beban tertentu diberikan, segera terjadi regangan sesaat ε_0, dan dengan berjalannya waktu regangan terjadi cepat, kemudian perlahan menurun ke laju regangan ε_1, selanjutnya mengalami laju regangan yang tetap. Keadaan pertama disebut melar transisi atau melar dingin karena terjadi meskipun pada temperatur rendah. Daerah yang mempunyai laju regangan tetap (laju melar) disebut melar keadaan mantap atau melar tahap kedua, yang merupakan bagian terbesar dari waktu yang terpakai. Apabila sampai pada regangan ε_2 dengan



Gb. 1.29 Kurva regangan-waktu dari melar (*creep*).

*Diagram korelasi diperoleh cukup banyak, tetapi agak sukar membacanya, oleh karena itu disarankan mempergunakan tabel. Metals Handbook ASM, edisi ke 8 jilid 1, 1234–1236 (1961), dibuat oleh SAE ASM, dan ASTM di AS membahas lebih terperinci.

melar tahap kedua, maka laju regangan meningkat menyebabkan pengecilan setempat (*necking*) dan sampai pada regangan putus akhirnya bahan patah. Daerah terakhir disebut melar tahap ketiga atau tahap putus.

Laju melar yang diperbolehkan pada dalam industri adalah 10^{-7}–10^{-4}%/jam, tetapi secara praktis tidak mudah memeriksa sifat melar bahan pada laju regangan yang demikian rendah, oleh karena itu pengujian dilakukan pada orde pangkat dua lebih besar yaitu: 10^{-5}–10^{-2}%/jam. Penegasan mengenai sifat melar adalah berdasarkan melar stasioner yang merupakan bagian terbesar dari umur melar. Atau mengabaikan melar transisi dan melar tahap ketiga, yang diperhatikan lama waktu sampai putus. Yang terakhir ini disebut juga pengujian putus-melar untuk membedakan dengan yang pertama. Dalam hal ini daripada hanya mengukur laju melar saja, sering juga dilakukan pengukuran regangan putus.

Kalau bahan untuk pesawat terbang berumur 10^3–10^4 jam, sifat-sifatnya dapat diperoleh dengan pengujian langsung mempergunakan waktu tersebut, tetapi dalam hal penggunaan temperatur tinggi untuk pembangkit tenaga listrik dengan umur 10–30 tahun, regangan dan umur sampai patah yang terjadi setelah waktu yang lama itu perlu diasumsikan dari hasil pengujian selama 10^4 jam (kira-kira satu tahun). Untuk maksud tersebut dipergunakan kinetika, karena kinetika dipakai juga untuk penentuan deformasi melar. Dalam hal ini didasarkan pada asumsi bahwa bahan selama melar terjadi dalam proses aktivasi panas yang tetap, tanpa komplikasi perubahan metalurgi. Sesungguhnya asumsi ini tidak benar, tetapi ditinjau dari sudut teknik hal tersebut dapat dilakukan, hanya perlu ada koreksi. Menurut kinetika hubungan berikut dapat dipakai sebagai laju melar:

$$\dot{\varepsilon}=Ae^{-Q/RT} \tag{1.34}$$

Di mana $\dot{\varepsilon}$ adalah laju melar, A adalah konstanta, Q adalah energi aktivasi dalam deformasi, R adalah konstanta gas, dan T adalah temperatur Kelvin. Dengan asumsi bahwa waktu yang menyebabkan regangan melar yang tidak berubah atau waktu patah melar berbanding terbalik dengan laju melar, perubahan waktu t pada persamaan (1.34) adalah:

$$t=Ae^{Q/RT} \tag{1.35}$$

Analisa hubungan ini telah dikemukakan terdahulu. Hubungan antara log t dan kebalikan temperatur ditetapkan dalam diagram sebagai berikut:

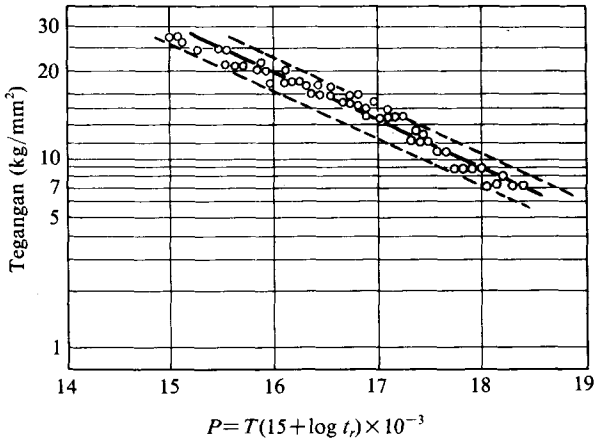
1) Log A konstan tidak tergantung tegangan, dan Q berubah karena tegangan.
2) Q konstan dan log A sebagai fungsi tegangan
3) Baik Q maupun log A berubah karena tegangan

Pada umumnya mungkin keadaan 3) tetapi biasanya dekat pada keadaan 1) atau 2). Dalam hal 1)

$$T(\log t+C)\equiv P_1=m(\sigma) \tag{1.36}$$

Konstanta $C(=\log A)$ harus tetap menurut percobaan, tetapi umumnya berkisar antara 15 sampai 30. Larson dan Miller[1)] mengusulkan bahwa itu tetap tidak tergantung pada bahan yaitu 20, $P_1=T(\log t+20)$ sebaiknya dibuat sebagai sebuah parameter. P_1 disebut parameter Larson-Miller. Gb. 1.30 menunjukkan hubungan antara tegangan dengan parameter ini dengan harga C sama dengan 15 derajat dari pengujian putus-melar sampai kira-kira 2×10^4 lam. Pengeplotan yang banyak sekali berkecenderungan

[1)]R. F. Larson and J. Miller: Trans. ASME, **74** (1952)



Gb. 1.30 Kurva utama dari pengujian putus-melar (*creep rupture*) pada baja 18 Cr-10 Ni-Ti dengan parameter Larson-Miller.
Temperatur: 600, 650, dan 700°C,
Waktu: sampai 2×10^4 jam.
Perkiraan statistik adalah lurus.
Garis titik-titik menyatakan 96% interval benar.

hampir garis lurus (umumnya merupakan garis lengkung)[1]. Ini dinamakan kurva utama dari melar. Dari Gb. 1.30 kekuatan putus melar pada 600° ($P_1=17{,}7\times10^3$) dan 650° ($P_1=18{,}7\times10^3$) selama 2×10^5 jam (20 tahun dan 10 bulan) didapat masing-masing pada beban 10 kgf/mm² (102 MPa) dan 6 kgf/mm² (61,2 MPa), dan dalam pertimbangan dari interval yang meyakinkan yang ditunjukkan dalam gambar, kesalahannya kira-kira $\pm1{,}5$ kgf/mm² (15,3 MPa). Parameter serupa dengan sedikit pernyataan terperinci adalah:

$$P_2=(\log t-\log ta)(T-Ta) \tag{1.37}$$

P_2 dinamakan parameter Manson. Selanjutnya dengan mengambil keadaan 2), terdapat:

$$P_3=\log t-(Q/2,\,303\,RT) \tag{1.38}$$

yang disebut parameter Sherby-Dorn.

Kawada dkk telah melaporkan bahwa dengan hasil pengujian putus melar untuk waktu yang lama kira-kira 2×10^4 jam sejumlah baja tahan panas dapat diurutkan dari ketiga parameter di atas, parameter Mansonlah yang paling cocok.

1.6 Kelelahan

Patahan lelah disebabkan oleh tegangan berulang, dan juga dijumpai pada tegangan kurang dari 1/3 kekuatan tarik statik pada bahan struktur tanpa konsentrasi tegangan. Dalam keadaan di mana pemusatan tegangan diperhitungkan, mungkin bahan akan putus pada tegangan yang lebih rendah. Jadi kelelahan memegang peran utama dalam putusnya bahan secara mendadak pada penggunaan suatu struktur atau komponen.

Semua patahan yang disebabkan kelelahan melalui tahapan proses: (terjadinya

[1]K. Kawada et al.: Tetsu-to-Hagane (in Japanese) **76** (1970)

retakan lelah)→(perambatan retakan lelah)→(patahan statik terhadap luas penampang sisa), oleh karena itu pencegahan masing-masing perlu dilakukan pada setiap tahapan proses tersebut di bagian yang paling efektif

Menghindari patahan statik pada tahap akhir tidaklah efektif karena patahan pada tahap itu tidak stabil. Tetapi perlu dipelajari secara seksama pada titik mana terjadi pengalihan retakan menjadi patah yang tidak stabil, karena hal tersebut mempunyai arti penting secara teoritis dan secara praktis. Terjadinya retakan tidak dapat dielakkan apabila pemusatan tegangan di dalam struktur dan komponen tidak terhindarkan, kalau sebelumnya ada sesuatu yang berhubungan dengan terjadinya retakan atau retakan tak tampak atau inklusi dan presipitat yang mengakibatkan pemusata tegangan. Jadi hal tersebut perlu dipelajari dengan maksud memperlambat perambatan retakan. Dalam hal ini perlu memahami sifat khas perambatan retakan, terutama ketergantungan terhadap tegangan dan panjangnya retakan.

1.6.1 Asal retakan

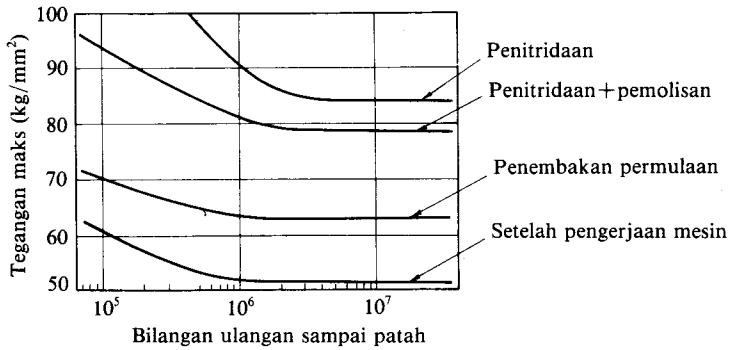
Kalau pengamatan dilakukan terhadap permukaan rata dari suatu batang uji tanpa takikan, yang dibebani berulang-ulang, perkembangan dari pita slip berbeda dibandingkan dengan yang terlihat pada batang uji percobaan tarik biasa. Kelanjutan lebih jauh dari tegangan berulang memperlebar sebagian pita slip, di mana tonjolan halus yang disebut intrusi dan ekstrusi terjadi yang perlahan-lahan berubah menjadi retakan kecil. Dalam hal ini patahan lelah terjadi sejajar dengan pita slip. Salah satu pencegahan kelelahan adalah mengendalikan retakan mikro tersebut. Menurut percobaan suatu retakan mikro berasal pada tahap yang sangat dini yaitu 0,1–0,5% dari umur kelelahan. Tidak benar menyatakan bahwa terjadinya retakan hanya penting dengan 1/1000–5/1000, tetapi perlu dimengerti bahwa kalau terjadinya retakan dalam satu minggu dapat diperpanjang menjadi dua minggu, maka umurnya dapat diperpanjang 20 tahun.

Dalam kelelahan logam walaupun retakan lelah tergantung pada slip, retakan lelah tidak terjadi pada tegangan mulur yang tinggi. Mulur pada pengujian tarik dan regangan mulur yang disebabkan tegangan mulur uji, diteliti dari hasil pergerakan jarak panjang dari sejumlah banyak dislokasi, sedangkan slip yang diperlukan untuk pengembangan retakan mikro dalam kelelahan terjadi pada mulur mikro yang jauh lebih rendah. Salah satu dari alasan itu ialah pembentukan sekala mikro dari dislokasi di sekitar inklusi dan perambatannya. Sejalan dengan itu bahan yang bersih dari inklusi menunjukkan umur kelelahan yang sangat panjang.

Dalam hal beban lentur dan beban puntir telah dikenal jelas bahwa permukaan melingkar dari batang uji mempunyai tegangan maksimum dan retakan lelah terjadi pada permukaan, dalam hal tarikan dan tekanan yang berulang-ulang pada tegangan yang merata, juga retakan lelah terjadi pada permukaan. Beberapa contoh telah dicatat bahwa kalau permukaan dengan pita slip yang diakibatkan oleh kelelahan di elektropolis setipis ukuran butir, maka umur kelelahan diperpanjang. Fakta terjadinya retak lelah pada permukaan bebas, menyatakan bahwa keadaan permukaan sangat mempengaruhi ketahanan lelah bahan.

Perlakuan permukaan seperti pengarbonan, penitridan memberikan peningkatan kekuatan pada lapisan permukaan, dan terjadi tegangan sisa berupa tegangan tekan pada permukaan, hal ini meningkatkan kekuatan kelelahan. Sebaliknya kalau terjadi pengurangan karbon pada permukaan, kekuatan kelelahan menurun. Tegangan sisa yang berupa tekan disebabkan oleh deformasi plastis dan perlakuan pelarutan (pengerasan presipitasi) meningkatkan kekuatan kelelahan, dengan penggeseran

tegangan efektip pada permukaan. Sebaliknya tegangan sisa yang berupa tarik pada permukaan menurunkan kekuatan kelelahan. Pada permukaan yang dikerjakan dengan mesin ada tegangan sisa pada lapisan setebal 0,01–0,1 mm, setelah disemprot pasir (*sand blast*) dan disemprot mimis (*shot peening*) tegangan sisa selanjutnya ditingkatkan sehingga kekuatan kelelahan bertambah (Gb. 1.31). Sebagai tambahan terhadap kekuatan permukaan, makin halus permukaan makin tinggi kekuatan kelelahan, karena pemusat tegangan pada permukaan menjadi hilang. Pelapisan permukaan memberikan hasil yang meskipun permukaan menjadi lebih keras dari logam induk karena pengaruh takikan, tegangan sisa tarik dan kegetasan hidrogen.



Gb. 1.31 Pengaruh kekerasan permukaan pada kekuatan kelelahan.
Kawamoto, M.: "Zairyo Shiken" (Material Testing), 133 (1965) (Asakura Shoten).

1.6.2 Perambatan retakan lelah

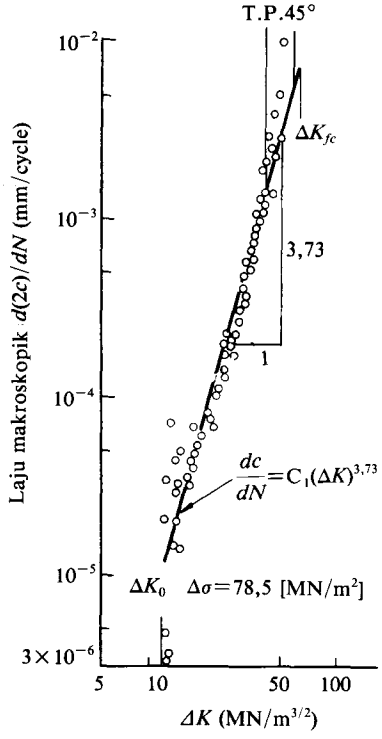
Apabila pemusatan tegangan terdapat pada struktur atau sesuatu yang serupa dengan retak mula, maka terjadinya retakan tidak dapat dihindari dan kondisi dari perambatan retak menjadi penting. Sejumlah banyak studi telah dilakukan dan hasilnya dapat diperoleh mengenai laju perambatan retak lelah, tetapi hubungan yang lengkap masih belum mantap. Hubungan yang paling sering dipakai adalah aturan pangkat empat dari Paris:

$$\frac{\Delta l}{\Delta N}=C\sigma(\Delta K)^4 \quad (=C\sigma^4 l^2) \tag{1.39}$$

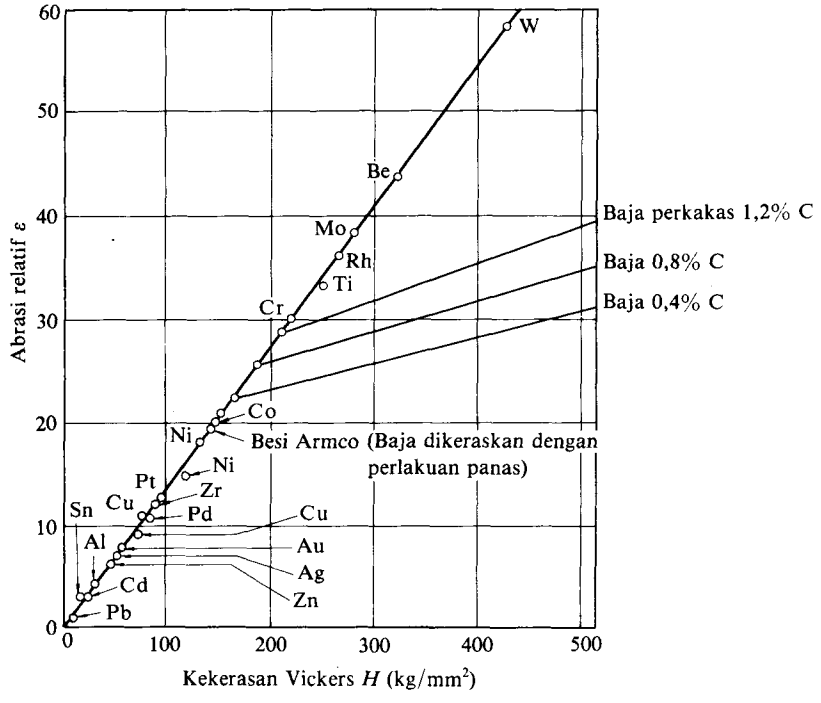
di mana l=panjang retakan, N=jumlah balikan tegangan, σ=tegangan dan ΔK =daerah perubahan dalam faktor intensitas tegangan tergantung pada panjang retakan. Hubungan ini tidaklah sempurna, tetapi dapat dipakai dalam daerah tegangan yang relatif luas, sebagai pendekatan pertama. Juga dapat dipakai untuk perhitungan umur kalau laju perambatan retakan diukur pada keadaan yang mendekati keadaan penggunaan. Salah satu dari hasil pengujian ditunjukkan dalam Gb. 1.32. Hubungan yang diutarakan di atas dapat dikatakan kira-kira mantap.

1.7 Keausan

Sebuah mesin mempunyai banyak komponen yang bekerja pada pergerakan dengan gesekan. Pada pergerakan relatif dengan tekanan, selalu terjadi friksi pada bidang kontak. Maka abrasi akan berlanjut, dan merusak ketelitian komponen yang



Gb. 1.32 Perambatan retak pada baja karbon rendah. (Nakazawa, H. dan Kobayashi, Bull. JSME. 40 (1974), 2712).



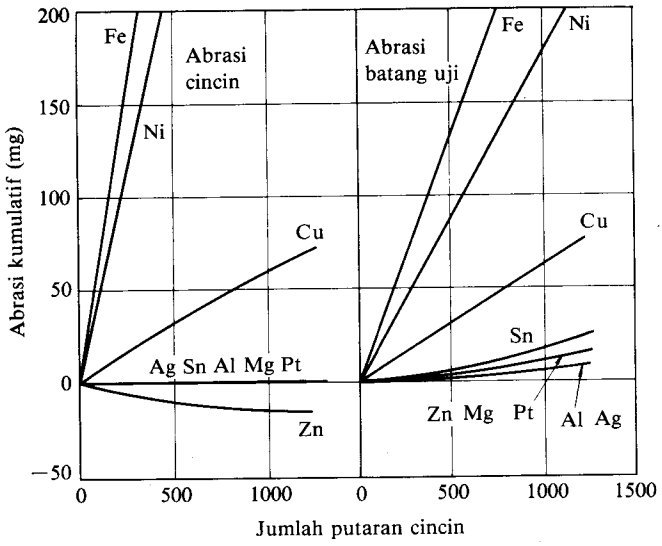
Gb. 1.33 Hubungan antara abrasi relatif ε dan kekerasan Vickers dalam abrasi kekasaran. Untuk logam murni: $\varepsilon=bH$, Untuk baja dengan perlakuan panas: $\varepsilon=\varepsilon_0+b'(H-H_0)$ di mana b, b': konstanta, ε_0, H_0: ε, H. dari baja yang dilunakkan.

selanjutnya berkembang terus menjadi lebih parah sampai pada satu saat komponen mesin kehilangan fungsinya dan patah.

Goresan karena bahan yang keras menyebabkan permukaan kasar. Pemolesan dengan bahan abrasi keras, kertas amperlas, atau campuran debu memberikan fenomena abrasi disebut keausan goresan atau keasuan permukaan licin. Sebagai perbandingan, keausan abrasi oleh kertas ampelas mempunyai laju keausan spesifik yang maksimum, relatif terhadap keausan abrasi karena Pb. Keausan relatif bagi logam murni dan baja yang dianil, ε, mempunyai korelasi baik dengan kekerasan Vickers seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.33. Bahan yang mengalami perlakuan panas dan kekerasannya lebih tinggi menyimpang dari hubungan proporsional, tetapi bahan yang lebih keras memiliki keausan relatif yang lebih besar.

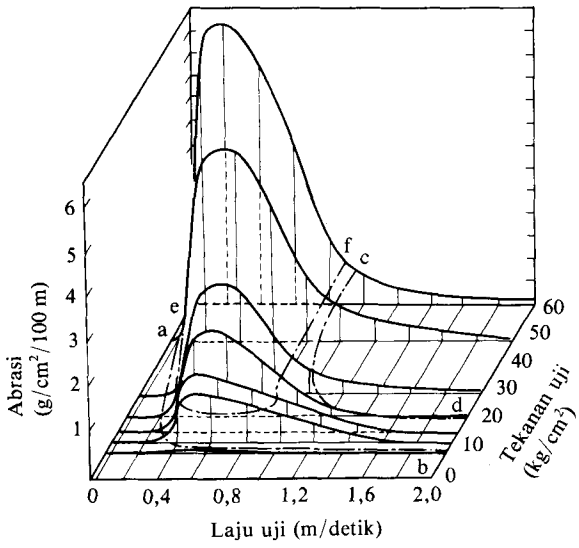
Banyak pertanyaan diajukan mengenai keausan di industri, ialah pada permukaan yang sangat halus, di mana umumnya dipergunakan pelumasan. Kalau pasangan permukaan itu bersentuhan satu sama lain dan bergerak relatif, tonjolan kecil menyebabkan kohesi logam, dan oleh penempelan pada permukaan sisi lain, tonjolan itu terpisah, maka abrasi berlanjut. Abrasi ini dinamakan keausan lengket. Karena kohesi tidak perlu terjadi selama terdapat film pelumas, maka sifat pembasahan pelumas menjadi pertanyaan. Dalam hal keausan lengket tidak ada bahan yang memenuhi standar, karena itu setiap bahan perlu diuji. Perbedaan keausan atas kombinasi logan telah diteliti secara terperinci oleh Yamamoto[1]. Gb. 1.34 menunjukkan contoh metoda di mana benda uji bersentuhan dengan cincin Fe. Kombinasi itu adalah:

1) Bahan yang susah membentuk paduan dan larutan padat,
2) Bahan yang mudah membentuk paduan dan larutan padat,
3) dari 2), dengan kisi kristal yang sama
4) dari 3), dengan konstanta kisinya yang sedikit perbedaannya, dan



Gb. 1.34 Perubahan abrasi dari kombinasi cincin besi dengan batang uji berbagai logam. Tekanan tetap: 2 kg/cm^2, Putaran: 57 putar per menit, Abrasi negatif dari [illegible] berarti menempelnya logam pada batang uji.

[1]N. Yamamoto: Bull. Jap. Soc. Mech. Eng. 8 (1934) 1–98



Gb. 1.35 Pengaruh laju pengujian dan tekanan terhadap abrasi besi cor.

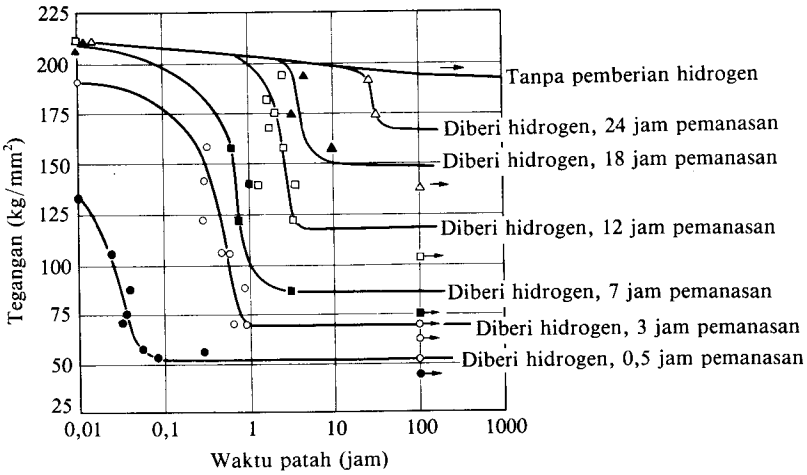
5) Bahan dengan keausan terbesar, dari bahan sama, berurutan dari mulai keausannya yang terkecil meningkat ke keausan terbesar.

Keausan menerima pengaruh yang besar dan rumit dari laju pergerakan relatif dan tekanan pada bidang kontak. Keausan kumulatif antara permukaan halus pada tekanan tetap menghasilkan harga maksimum pada laju pergerakan relatif tertentu. Makin besar tekanan kontak makin besar harga maksimum itu. Gb. 1.35 menunjukkan hubungan antara tekanan kontak, laju relatif dan keausan kumulatif untuk besi cor. Sekitar laju relatif pada keausan abrasi maksimum terjadi keausan goresan. Pada sisi dengan laju lebih rendah dari harga maksimum, yaitu di bawah a-b, lapisan oksida terbentuk dan ini adalah daerah keausan oksidasi terpusat pada tempat jatuhnya oksida. Pada sisi dengan laju lebih tinggi dari harga maksimum, yaitu ke sebelah kanan dari c-d, di mana pembentukan panas lebih besar dari pengambilan panas, temperatur mungkin menjadi lebih tinggi dari titik cair di lapisan tipis pada permukaan. Ini dinamakan daerah keausan fusi. Luas daerah e-f pada gambar dengan keausan yang lebih besar adalah daerah yang ditentukan oleh keausan goresan. Sebagai tambahan kepada apa yang telah dijelaskan di atas, ada keausan korosi akibat zat kimia dan proses elektrokimia dari bahan pelumas dan klad permukaan demikian juga keausan fret yang menyebabkan kerontokan oleh retakan lelah lokal karena tegangan yang berulang-ulang dari persentuhan yang tegangannya lebih tinggi dari batas elastik, seperti halnya pada kam, roda gigi dan rol.

1.8 Pengaruh lingkungan pada kekuatan dan patahnya bahan

Lingkungan yang bersifat korosi memberikan pengaruh besar pada patahnya dan mengurangi kekuatan putus. Korosi merupakan proses yang lama, yang tidak begitu efektif pengaruhnya kepada kekuatan dalam waktu yang singkat, seperti misalnya pada kekuatan tarik, tetapi lebih berpengaruh pada kekuatan kelelahan dan kekuatan melar.

Di bawah ini diutarakan mengenai patah terlambat. Satu macam baja yang kuat



Gb. 1.36 Kurva waktu patah terlambat baja AISI 4340 dengan hidrogen sisa yang berbeda oleh pemanasan pada 194°C dalam waktu berbeda bila setelah diberi hidrogen secara elektrolitik.

diberi beban statik selama waktu tertentu, tiba-tiba patah tanpa deformasi plastis, ini dinamakan patah terlambat. Dari pangkal takikan, hidrogen diabsorb karena pengaruh lingkungan, maka rekatan terjadi dan merambat perlahan-lahan, dan kalau dalamnya telah cukup untuk menyebabkan patahan yang tidak stabil, tiba-tiba patah terjadi. Karena gejala ini serupa dengan patah lelah berkenaan dengan adanya: tegangan, laju pertumbuhan retak, dan waktu yang diperlukan untuk patah, gejala ini juga disebut statik. Gb. 1.36 menunjukkan hasil pengukuran hubungan antara beban dan waktu patah dengan merubah hidrogen sisa dalam baja AISI 4340 (baja Ni–Cr–Mo), di mana hidrogen ditambahkan secara elektrolisa, dengan memanaskannya pada 50°C selama 0,5–24 jam. (Kurva tersebut dinamakan juga kurva S-N patah terlambat)

Di sini dapat dikatakan bahwa batas tegangan patah terlambat berhubungan dengan batas lelah yang menurun, sesuai dengan meningkatnya kadar hidrogen, dan waktu patahnya menjadi singkat.

Permukaan patahan dari patah terlambat ditemukan dua keadaan yaitu antar butir dan melintas butir. Patahan kebanyakan disebabkan kegetasan hidrogen, tetapi ada juga yang disebabkan korosi tegangan, yang terjadi dalam suatu lingkungan elektrokimia. Perambatannya korosi melalui struktur logam yang aktif dipercepat oleh tegangan.

Bahan dipergunakan secara luas dalam atmosfer, maka dapat mengalami patah akibat atmosfer disebabkan oleh korosi dan absorpsi hidrogen, yang bertindak sebagai pereduksi dari harga K_{IC} keuletan patah.

1.9 Cacat bahan dan pengujian tak merusak

Dengan melaksanakan berbagai pengujian termasuk pengujian tak merusak dalam proses produksi dari bahan industri, kemungkinan adanya cacat bahan sangat kecil, tetapi tidak mungkin mempunyai bahan yang bebas dari cacat. Maka telah dikembangkan cara pengujian tak merusak untuk mengetahui cacat tersebut. Pengujian tak merusak untuk produk akhir dilakukan untuk memberikan jaminan kualitas

juga jaminan tidak adanya cacat yang membahayakan penggunaan. Di samping itu untuk bagian-bagian dan komponen utama, pengujian tak merusak dilakukan pada saat pemeriksaan reguler. Dalam ini cacat telah terlihat pada pengujian akhir, tetapi ada kemungkinan menjadi parah selama waktu tertentu dalam pemakaian. Hal itu terjadi karena kondisi yang berbeda dengan yang ditetapkan pada design atau memang diharapkan terjadi retakan lelah dalam pemakaian, sebagai misal pada komponen pesawat terbang. Jadi perlu ditentukan apakah terjadi pertumbuhan kalau diperpanjang waktunya ataukah mungkin akan menjadi sebab patah jenis lain.

(1) Pengujian pewarnaan

Cara ini dipakai untuk medeteksi cacat dengan penembusan zat pada celah cacat di permukaan. Cairan fluoresen atau cairan pewarna dipakai untuk maksud ini. Yang pertama diamati di bawah sinar UV dengan panjang gelombang 330–390 mm, dan yang terakhir diamati di bawah sinar tampak terang.

(2) Pengujian dengan bubuk magnet

Kalau bahan yang dapat dimagnetkan, misalnya baja, berada dalam medan magnet, fluks magnet pada baja akan terputus oleh adanya retakan atau inklusi di sekitar permukaan jadi bubuk magnet akan diabsorb, kepekaan pengamatan sangat tinggi kalau konduksinya baik.

(3) Pengujian dengan arus Eddy

Kalau batang uji ditempatkan dalam lilitan yang dialiri arus listrik frekuensi tinggi, maka arus Eddy yang mengalir pada batang uji berubah kalau ada cacat, yang akan memberikan induksi perubahan tegangan listrik oleh impedansi lilitan atau dalam lilitan sendiri, jadi dihasilkan sinyal listrik.

Cara ini dipakai untuk menentukan bagian yang tidak pejal dilihat dari amplitude dan fasa dari sinyal tersebut.

(4) Pengujian penyinaran

Dengan mempergunakan sinar X, sinar gama dan sinar netron yang memiliki daya tembus besar melalui benda, memungkinkan untuk mengetahui adanya cacat dari bayangan pada film yang ditempatkan di belakang benda, yang menunjukkan variasi intensitas, karena perbedaan absorpsi sinar oleh rongga dan kepadatan di dalam benda.

(5) Pengujian ultrasonik

Gelombang ultrasonik 1–5 MHz merambat dalam bahan dan memantul di tempat cacat, dari diteksi gelombang pantulan dapat diketahui adanya cacat. Untuk memancarkan dan menerima gelomgang ultrasonik dipergunakan kristal barium titanat atau lainnya yang mempunyai sifat efek piezoelektrik. Gelombang ultrasonik memantul 100% dari celah dan retakan, oleh karena itu, kepekaan pengamatan sangat tinggi dibandingkan dengan pengujian dengan penyinaran yang tidak dapat mengamati cacat kecuali jika benda ujinya mempunyai ketebalan 1–2 inch. Akan tetapi yang terditeksi adalah puncak gelombang pantulan yang memerlukan pengalaman untuk menentukan keadaan cacat pada bahan.

(6) Pengujian pancaran akustik

Kalau deformasi plastis atau patahan terjadi gelombang suara dibangkitkan oleh pembebasan gelombang tekanan. Hal ini dinamakan pancaran akustik yang

dipergunakan dalam pengujian tak merusak bentuk baru. Untuk mendeteksi gelombang suara, mempergunakan cara yang sama dengan pada pengujian ultrasonik dengan mempergunakan bahan piezoelektrik dan dengan menganalisa liwat amplifikasi gelombang yang diterima, jumlah kejadian, frekuensi dan energi suatu gejala yang dianggap menyebabkan bunyi. Kalau dipergunakan secara sempurna, dapat dipakai untuk mendeteksi retak lelah atau retak korosi tegangan dalam komponen mesin.

2 FAKTOR PENGUAT BAHAN INDUSTRI

Bagi pesawat terbang, mempunyai komponen struktur yang ringan adalah suatu keharusan. Demikian juga pada beberapa penggunaan biasa seperti pada kapal laut, kereta api dan lainnya. Tenaga dan bahan bakar dapat dihemat apabila mereka itu ringan. Bahkan untuk yang hanya memerlukan ketahanan terhadap beban, juga diinginkan bahan ringan. Di samping memperbaiki efisiensi dan menghemat sumber melalui berbagai cara, dalam banyak hal penggunaan praktis hanya dapat dilaksanakan apabila bahan dibuat ringan.

Oleh karena itu salah satu objektif yang dituju dalam teknologi bahan adalah memperbaiki kekuatannya.

2.1 Penguatan dengan penghalusan butir

Pada umumnya kekuatan bahan industri dapat ditingkatkan dengan memperkecil unit strukturnya. Bagi bahan logam dilakukan pertama dengan memperhalus butir struktur mikronya. Bagi kebanyakan logam ukuran butir mempunyai hubungan dengan tegangan mulur.

$$\sigma_y = \sigma_i + kd^{-1/2} \tag{1.40}$$

di mana σ_y adalah tegangan mulur, σ_i dan k adalah konstanta bahan yang tidak tergantung pada ukuran butir, dan d adalah diameter butir. Sebagai kekuatan mulur, apabila mulur terjadi secara tidak kontinu maka umumnya dipakai kekuatan mulur yang terendah, dan apabila mulur terjadi kontinu maka dipakai tegangan uji 0,2%. Seperti telah jelas dari persamaan kalau d diperbesar tak terhingga suku kedua menjadi nol, jadi σ_i dapat dikatakan kekuatan mulur kristal tunggal dari bahan yang sama.

Selanjutnya temperatur transisi liat-getas T_C, yang menjadi pertanyaan bagi bahan besi dan baja dapat dijelaskan sebagai berikut:

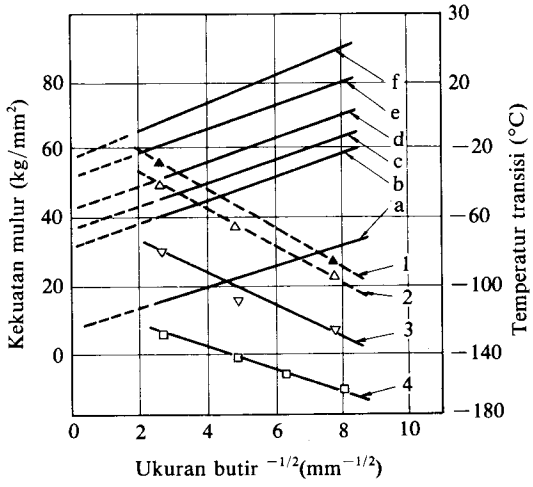
$$T_C = B - Cd^{-1/2} \tag{1.41}$$

di mana B dan C menjadi konstanta bahan apabila temperatur dan laju regangan tidak berubah.

Persamaan (1.40) dapat diperoleh secara teori dengan mempergunakan konsep dislokasi, dan persamaan (1.41) dapat juga dibuat dengan melihat persamaan (1.40) dan perubahan temperatur sebagai σ_i. Gb. 1.37 menunjukkan contoh hasil pengujian. Jelas bahwa kedua persamaan di atas telah mantap.

Dasar pemikiran di atas adalah berdasarkan bahan yang dipergunakan pada temperatur kamar atau lebih rendah, contohnya akan diutarakan di bagian berikut.

MILIK
Perpustakaan Nasional
... Jawa Timur



a: 20°C, b: −130°C, c: −142°C,
d: −158°C, e: −180°C, f: −190°C
Temperatur transisi 1: Pengujian Charpy
Temperatur transisi 2: 50% patah
Temperatur transisi dari pengujian tarik
dengan takikan, 3: Temperatur di mana COD:
0,5 mm. 4: Temperatur transisi tegangan patah rendah

Gb. 1.37 Pengaruh ukuran butir pada berbagai temperatur transisi dan kekuatan mulur baja lunak.

2.2 Pengerasan larutan padat

Pada pembahasan kristal tinggal, jelas bahwa logam murni mempunyai kekuatan rendah. Oleh karena itu itu untuk memperkuat bahan, dilakukan juga usaha menambahkan unsur paduan. Akan dikemukakan kemudian bahwa terdapat fasa padat yang disebut larutan padat, yang dibuat dengan menambahkan berbagai unsur. Unsur yang ditambahkan disebut unsur terlarut. Larutan padat jauh lebih kuat dari logam murninya. Bagi atom terlarut diketahui mempunyai banyak faktor seperti: perubahan dimensi, di mana diameter atom berbeda dengan diameter atom matriks, sesuai dengan itu modulus kekakuan yang disebabkan medan regangan elastik mendorong peningkatan modulus elastik di medan antar aksi dengan atom terlarut, faktor lain adalah faktor elektrokimia dan lainnya. Tabel 1.9 menunjukkan contoh yang

Tabel 1.9 Peningkatan kekuatan mulur oleh konsentrasi cacat kisi dalam kristal.

Bahan	Cacat	Modulus kekakuan per perbandingan atom
Al	Atom substitusi	$\mu/10$
Cu	Atom substitusi	$\mu/20$
Fe	Atom substitusi	$\mu/16$
Ni	Karbon interstisi	$\mu/10$
Nb	Atom substitusi	$\mu/10$
KCl	F tengah	$\mu/2{,}5$
NaCl	Ion substitusi monovalen	$\mu/100$
Al (dicelup dingin)	Piringan kekosongan atom	2μ
Cu (diradiasi)	Atom Cu interstisi	9μ
Fe	Karbon interstisi	3μ
LiF (diradiasi)	F interstisi	4μ
Nb	N interstisi	2μ
KCl	Cl Interstisi	7μ*
NaCl	Ion substitusi bivalen	2μ

*Harga yang diektrapolasi dari 100 ppm.

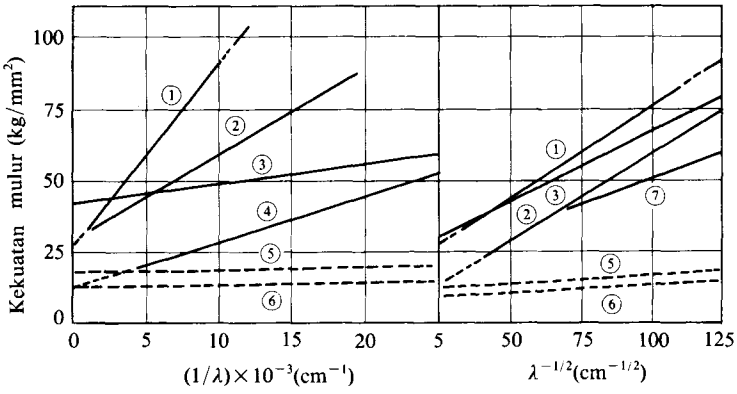
menyatakan penguatan dalam perbandingan dengan mudulus kekakuan dari matriks per perbandingan atom. Penguatan dapat dibagi menjadi dua kelompok yang tidak digolongkan oleh keadaan pencampuran dari atom yang ditambahkan tetapi oleh perbedaan cacat yang terjadi karena penambahan dari atom yang berbeda, seperti telah dikenal dari kelompok dengan penguatan yang lebih tinggi di mana medan regangan dihasilkan oleh cacat tidaklah isotropik. Antara kedua kelompok ada perbedaan kira-kira dua tingkat maksimum dari penguatan.

2.3 Penguatan presipitasi dan dispersi

Perlakuan di mana atom terlarut ditambahkan melampaui kelarutannya, untuk membuat larutan padat pada temperatur tinggi, perlakuan ini dinamakan perlakuan pelarutan. Setelah perlakuan ini, dengan memanaskan pada berbagai temperatur umumnya timbul fasa presipitat. Presipitat berbeda dalam ukuran dari mulai yang sangat kecil yang hanya terlihat di bawah mikroskop elektron sampai ke ukuran besar yang dapat dilihat di bawah mikroskop optik dengan pembesaran yang rendah. Presipitat bentuknya bermacam-macam, ada yang seperti bola, seperti pelat atau seperti jarum. Karena tegangan mulur meningkat sangat kalau presipitat terdispersi di dalam larutan padat, maka disebut juga penguatan dispersi. Gb. 1.38 menunjukkan hasil dari pengerasan dispersi pada baja.

Penguatan dispersi telah dikembangkan lanjut untuk menghasilkan beberapa bahan yang diperkuat oleh campuran bubuk buatan, serat dsb, yang menjadi kuat secara efektif. Bahan tersebut dinamakan bahan komposit, yang lebih banyak dilakukan bagi bahan polimer dan ceramik seperti telah dikemukakan pada bagian III dan IV, dari pada bagi bahan logam.

Untuk bahan logam, satu contoh dapat dikemukakan dalam bahan tahan panas. Disarankan paling baik untuk memperkuat larutan padat yang berkekuatan super pada temperatur tinggi dengan dispersi yang tidak bereaksi dengan matriks. Untuk maksud tersebut fasa terdispersi yang dipakai yang melebihi kekuatan pada



① : Kunitake, baja 0,13% C Mn-Ni-Mo
② : Nakamura dkk, baja 0,45% C
③ : Roberts dkk, baja 0,7%, 1,06% C
④ : Imai, Miyazaki, Fe-SiO_2, Al_2O_3, MgO,
⑤ : Keh-Wriedt, Fe-N penuaan celup dingin (*quench aging*)
⑥ : Leslie, penuaan celup dingin
⑦ : Kossowsky-Brown, baja 0,48

Gb. 1.38 Perubahan kekuatan mulur baja lunak oleh penguatan dispersi.

temperatur tinggi dan stabil berupa oksida seperti Al_2O_3 dan ThO_2. Bahan tersebut dibuat dengan teknik metalurgi bubuk yang akan dikemukakan pada bagian II.

2.4 Struktur yang diperkuat

Besi dan baja sering diberi perlakuan panas agar memiliki struktur mikro yang kuat.

Baja berkekuatan tinggi dapat diperoleh dengan mengubah fasa austenit yang mengandung karbon dalam bentuk larutan pada temperatur tinggi, menjadi fasa martensit dengan pencelupan dingin pada temperatur rendah. Martensit adalah larutan padat karbon yang dipaksakan, mempunyai bentuk kisi tetragonal. Dengan pencelupan dingin, baja yang berkadar 0,4% C atau lebih memperoleh kekuatan mulur 1.700 MPa atau lebih, tetapi bersifat getas dan baru dapat dipakai setelah diadakan penemperan untuk memperoleh keliatan walaupun kekuatannya agak menurun. Yang memberikan kekuatan pada martensit terutama unsur karbon. Penambahan Mn, Si, Ni, Cr, Mo dan unsur lainnya akan memperbaiki keras serta keuletannya.

Menahan austenit dalam keadaan kurang stabil pada temperatur antara 400–550°C, yang dideformasikan sangat sebelum terjadi transformasi, dan kemudian didinginkan tiba-tiba; maka akan menghasilkan martensit yang sangat halus dan mempunyai sejumlah kisi sehingga memiliki kekuatan tinggi. Metoda ini dinamakan "ausforming" dan pada umumnya cara yang serupa dinamakan perlakuan termomekanik. Ausforming tidak dapat dilakukan terhadap baja karbon biasa, sehingga baja harus dipadu dengan Cr, Ni, Si dan lainnya. Dengan penemperan yang cocok setelah proses ausforming maka baja akan mencapai kekuatan maksimum 3100 MPa dan masih mempunyai keuletan cukup.

Baja sesudah diproses dengan metoda di atas mendapat kekerasan yang ekstrim, oleh karena itu keburukannya adalah tidak dapat dimesin atau dilas.

Baja maraging yang berkadar karbon minimum dapat dikeraskan melalui presipitasi senyawa antar logam. Baja tersebut mempunyai kadar paduan Ni 18–25% dan kadar karbon kurang dari 0,03%, dipadu pula dengan unsur sekunder lainnya. Martensit kubus yang ditemper memiliki kekuatan yang ekstrim dengan keuletan yang baik pada atau sebelum tahap presipitasi senyawa antarlogam dilakukan. Kekuatan maksimum yang diperoleh kira-kira 3000 MPa. Dalam pengelasan tidak mendapat kesukaran karena tidak mengandung banyak karbon. Pesawat jumbo 747 dikembangkan dengan mempergunakan bahan ini pada komponen struktur rodanya.

3 MEKANISMA SLIP DAN DISLOKASI

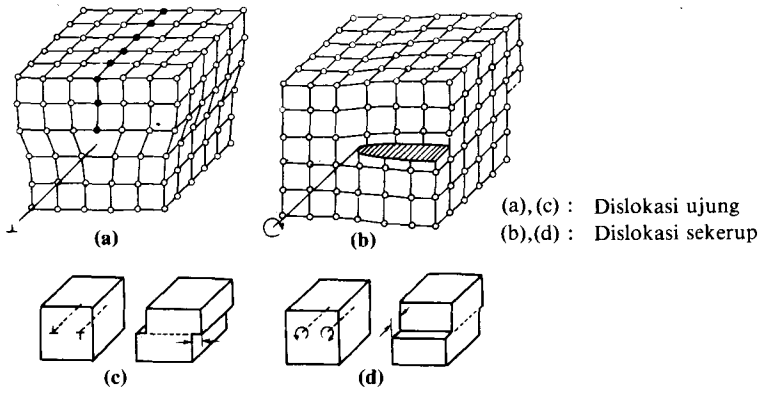
Deformasi bahan disebabkan oleh slip pada bidang kristal tertentu, hal ini telah dikemukakan terdahulu. Kalau gaya yang menyebabkan slip ditentukan dengan pengandaian bahwa seluruh atom pada bidang slip kristal serempak bergeser, maka gaya tersebut akan besar sekali. Dalam kristal terdapat cacat kisi yang dinamakan dislokasi. Dengan pergerakan dislokasi pada bidang slip maka terjadilah slip yang menyebabkan deformasi dengan memerlukan tegangan yang sangat kecil.

Kalau kristal dipotong menjadi pelat tipis dan dipoles, diets atau dipoles secara elektrolisa, maka akan terlihat di bawah mikroskop elektron sejumlah cacat yang disebut dislokasi. Dislokasi merupakan cacat kisi yang menentukan kekuatan bahan berkristal.

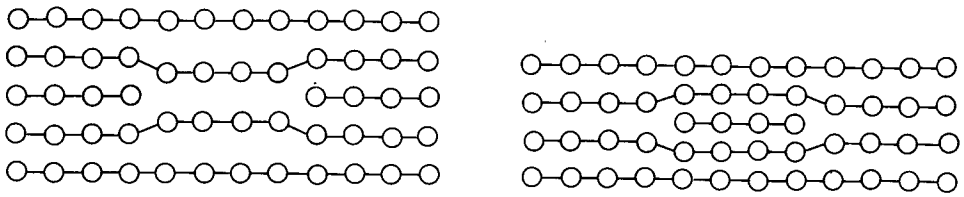
Seandainya suatu kristal logam dapat dibuat tanpa dislokasi, maka kekuatan mulurnya kira-kira 1/6 dari modulus elastiknya atau 1000–10.000 kali kekuatan mulur kristal yang sesungguhnya. Kristal berbentuk serat (*filament*) yang dinamakan "Wisker" telah dibuat dari berbagai bahan logam, kekuatannya seperti yang diperkirakan dari teori di atas. Kristal logam biasa mengandung dislokasi kira-kira 10^5–10^8 cm/cm^3 meskipun setelah dianil. Kalau logam diberi deformasi plastis yang sangat atau pengerjaan dingin yang kuat, maka dislokasi meningkat mencapai 10^{11}–10^{13} cm/cm^3.

3.1 Dislokasi dan vektor Burger

Gb. 1.39 menunjukkan dua macam dislokasi dalam kristal berkisi kubus, yang bergerak dalam kisi kristal dan keluar. Pergerakan dislokasi menyebabkan satu tahap karena adanya pergeseran (*slip*) *b*. Arah dan ukuran *b* adalah tetap menurut geometri



Gb. 1.39 Dua macam dislokasi dalam kisi kubus.



(a) Kohesi dari kekosongan (b) Kohesi dari atom interstisi

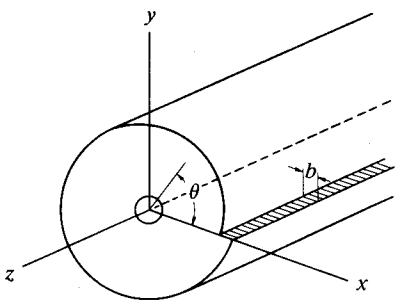
Gb. 1.40 Lup dislokasi prismatik.

kristal, b dinamakan vektor Burgers. Seperti dijelaskan pada gambar (a), kalau pada dislokasi tersebut garis dislokasinya tegak lurus pada b, dislokasi ini disebut dislokasi ujung. Sedangkan pada gambar (b) garis dislokasi sejajar dengan b, dislokasi ini disebut dislokasi sekerup. Jenis dislokasi lain ialah garis dislokasinya membentuk sudut tertentu dengan b yang disebut dislokasi campuran. Seperti dijelaskan dalam gambar kadang-kadang dislokasi melintas kristal, tetapi pada umumnya merupakan suatu lup dan garis dislokasi tidak berakhir dalam kristal. Oleh karena itu lup dislokasi berubah sifatnya dari dislokasi sekerup ke dislokasi campuran ke dislokasi ujung dst., atau vektor Burgernya serupa di setiap bagian. Yang terakhir ini dinamakan lup dislokasi prismatik yang terdiri dari kekosongan kisi dan atom interstisi (Gb. 1.40).

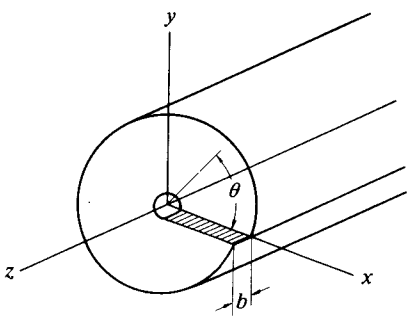
3.2 Medan tegangan di sekitar dislokasi

Kisi kristal di sekitar garis dilokasi mengalami deformasi sehingga terdapat tegangan dan regangan. Hal ini mudah dimengerti dengan membayangkan dislokasi di dalam kisi kristal. Dislokasi bergerak pada bidang slip. Umpamakan bidang slip dipotong, bagian atas dan bagian bawah kristal bidang slip dapat bergerak sejauh b dan kristal bersatu lagi pada bidang slip itu, akhirnya menghasilkan dislokasi yang bergerak sampai ke ujung kristal. Keadaan akhir pergerakan tersebut dilukiskan pada Gb. 1.41 untuk dislokasi ujung dan pada Gb. 1.42 untuk dislokasi sekerup. Pada bagian kristal yang lebih dekat kepada dislokasi tegangannya makin tinggi, untuk memudahkan, pada gambar dibuat lubang.

Komponen tegangan pada dislokasi ujung ditentukan dari persamaan berikut:



Gb. 1.41 Dislokasi ujung.



Gb. 1.42 Dislokasi sekerup.

$$\left.\begin{aligned} &\sigma_{xx}=-\frac{D_y(3x^2+y^2)}{(x^2+y^2)^2}, \qquad \sigma_{yy}=\frac{D_y(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2}, \\ &\sigma_{zz}=\nu(\sigma_{xx}+\sigma_{yy}), \qquad \sigma_{yz}=\sigma_{zy}=\sigma_{xz}=\sigma_{zx}=0 \\ &\sigma_{xy}=\frac{D(x^2-y^2)}{(x^2+y^2)^2}, \qquad D=\frac{\mu b}{2\pi(1-\nu)} \end{aligned}\right\} \tag{1.42}$$

Dan dalam hal dilokasi sekerup ditentukan dari persamaan berikut:

$$\left.\begin{aligned} &\sigma_{xx}=\sigma_{yy}=\sigma_{zz}=0 \\ &\sigma_{xz}=\sigma_{zx}=-\frac{\mu b}{2\pi}\frac{y}{(x^2+y^2)} \\ &\sigma_{yz}=\sigma_{zy}=\frac{\mu b}{2\pi}\frac{y}{(x^2+y^2)} \end{aligned}\right\} \tag{1.43}$$

Persamaan ini menyatakan bahwa makin jauh dari titik dislokasi, tegangan menurun sebanding dengan jarak yang akhirnya menjadi nol pada jarak tak terhingga. Pada titik tengah tegangannya tak terhingga. Hal ini disebabkan karena peranan tersebut diturunkan dengan perumpaan benda kontinu. Oleh karena itu perlu ada cara penyelesaian lain, yang disebut inti dislokasi.

3.3 Energi dislokasi

Energi regangan yang dimiliki per satuan panjang garis dislokasi disebut energi dislokasi, yang dikemukakan sebagai berikut:

$$\left.\begin{aligned} &1)\ \text{Dislokasi sekerup} \quad \xi=(\mu b^2/4\pi)\log(R/5b) \\ &2)\ \text{Dislokasi ujung} \quad \xi=\{\mu b^2/4\pi(1-\nu)\}\log(R/5b) \\ &3)\ \text{Dislokasi campuran} \quad \xi=\{\mu b^2/4\pi(1-\nu)\}(1-\cos^2\theta)\log(R/5b) \end{aligned}\right\} \tag{1.44}$$

di mana R adalah jari-jari kristal. Tidak berguna menentukan medan dislokasi yang besar karena secara kasar $\log(R/5b)$ kira-kira 4π. Jadi energi dislokasi sekerup adalah μb^2, energi dislokasi ujung $\mu b^2/(1-\nu)$ dan energi dislokasi campuran adalah $\{\mu b^2/(1-\nu)\}(1-\cos^2\theta)$. Sudut θ adalah sudut antara garis dislokasi dan vektor Burgers, dan energi dislokasi campuran adalah jumlah energi dislokasi ujung dengan vektor Burgers $b\sin\theta$ dan dislokasi sekerup dengan vektor Burgers $b\cos\theta$.

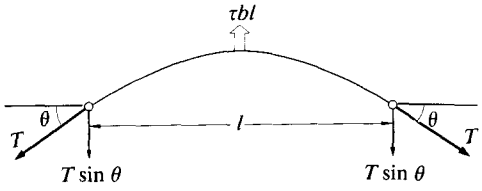
3.4 Tegangan garis dislokasi dan gaya yang bekerja pada dislokasi

Dislokasi mempunyai garis tegangan pada arah garis dislokasi. Kalau gaya per satuan panjang adalah T, maka

$$T=\mu b^2 \tag{1.45}$$

yang hampir serupa dengan energi dislokasi.

Dislokasi bekerja kalau memberikan perpindahan dalam kristal pada bidang sepanjang vektor Burgers, pada arah tegak lurus garis dialokasi. Gaya yang bekerja pada dislokasi adalah:



Gb. 1.43 Keseimbangan gaya-gaya antara dislokasi.

$$\left.\begin{aligned} F &= -\sigma_{xy} b \text{ dislokasi sekerup} \\ F &= -\sigma_{yz} b \text{ dislokasi ujung} \end{aligned}\right\} \tag{1.46}$$

keduanya-duanya bekerja tegak lurus pada setiap bagian garis dislokasi. Kalau tegangan geser dinyatakan dengan τ, dapat ditulis $F=\tau b$ Gaya yang bekerja pada dislokasi diimbangi oleh tegangan garis. Seperti ditunjukkan pada Gb. 1.43, di sepanjang l di mana dislokasi dapat bebas bergerak dan diberi gaya dari luar. Karena ada dalam keseimbangan pada arah tegak lurus garis dislokasi, komponen tarik T pada arah ini adalah $T \sin \theta$ terjadi di kedua ujung dari garis l. Maka:

$$\tau bl = 2T \sin \theta = 2\mu b^2 \sin \theta \tag{1.47a}$$

harga ini mempunyai harga maksimum pada $\theta=90°$ yaitu kalau garis dislokasi membentuk setengah lingkaran.

$$\tau_{\text{maks}} = \frac{2\mu b}{l} \tag{1.47}$$

adalah harga maksimum dan kalau harga ini bekerja maka dislokasi bergerak lebih cepat. Persamaan (1.47) sering dipakai kalau keadaan dislokasi memberikan tegangan mulur.

3.5 Pelipat gandaan dislokasi

Apabila ada bagian dislokasi yang dapat bergerak, karena tegangan dari persamaan (1.47), garis dislokasi akan melengkung berbentuk setengah lingkaran pada bidang slip, yang tidak stabil dan seterusnya berubah menjadi suatu lup meninggalkan garis dislokasi asal sepanjang l. Mekanisma ini disebut mekanisme pelipat gandaan dislokasi Frank-Read, dan garis dislokasi asal dinamakan sumber dislokasi Frank-Read.

Tahapan slip pada permukaan kristal yang dapat dilihat di bawah mikroskop optik sebagai garis slip, kira-kira berjarak 1000 kali panjang vektor Burger. Sumber dislokasi berlipat ganda, lup satu menyusul lup terdahulu membuat lebih dari 1000 lup dan akhirnya timbul ke permukaan membentuk tahapan slip yang dapat terlihat di bawah mikroskop.

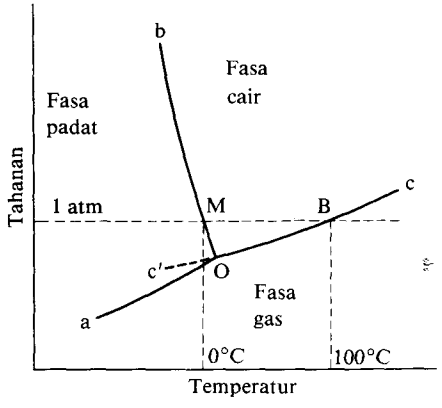
4 DIAGRAM FASA SEBAGAI DASAR METALOGRAFI

Struktur dan sifat logam murni sangat berubah apabila dipadu dengan unsur lain. Kelakuan bahan seperti itu dapat dilihat juga pada bahan cair dan gas, tetapi yang sangat menyolok terdapat pada bahan padat.

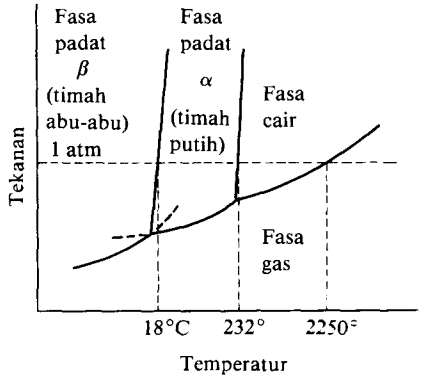
Kalau bahan (komponen A) menjadi sistim dua komponen dengan menambahkan komponen B, fasa baru tidak terbentuk apabila B larut dalam keadaan padat dalam A. Tetapi apabila B dipadukan melebihi kelarutan maksimumnya maka terjadi campuran larutan padat jenuh dan berlebihan fasa B. Kadang-kadang A dan B bereaksi satu sama lain membentuk fasa lain. Dalam sistim tiga komponen atau sistim berkomponen banyak maka sistim itu menjadi berfasa banyak yang rumit. Sifat bahan berubah yang disebabkan oleh perbandingan campuran dan kondisi campuran fasa yang ada. Hubungan antara jumlah setiap komponen dan fasa yang terjadi dapat dilihat dari diagram fasa yang dapat memberikan informasi mengenai sifat bahan.

4.1 Diagram fasa sistim satu komponen

Keadaan sistim komponen dapat ditentukan dalam tekanan P dan temperatur T tertentu. Persamaan fasa gas $PV=RT$ mempunyai hubungan tertentu antara P, T dan V, jadi apabila P dan T tertentu, volume V atau masa jenisnya juga tertentu. Hal serupa berlaku terhadap fasa cair dan fasa padat. Keadaan in dinyatakan dalam diagram P, T. Gb. 1.44 menunjukkan daerah keadaan gas, cair dan padat dengan berbagai kombinasi P dan T, dengan mengambil air sebagai contoh. Kalau pada tetahan tetap misalnya 1 atm, temperatur diubah, terjadi fasa padat (es) di bawah titik cair (0°C), fasa cair (air) dalam daerah temperatur antara titik cair dan titik didih (100°C) dan fasa gas (uap) di atas titik didih. Ada dua fasa cair dan gas pada titik didih, Gb.



Gb. 1.44 Diagram fasa air.



Gb. 1.45 Diagram fasa timah putih.

1.45 menunjukkan diagram $P-T$ untuk timah. Diagram yang menunjukkan fasa yang ada dalam keseimbangan disebut diagram fasa.

4.2 Aturan fasa

Aturan fasa berguna kalau sistim komponen banyak berada dalam keseimbangan. Kalau jumlah komponen dalam sistim adalah C dan fasa yang ada ialah P, dengan derajat kebebasan F yang merupakan jumlah variabel yang dapat berubah bebas tanpa memberikan pengaruh, membuat fasa ada dalam keadaan sama, maka:

$$F=C+2-P \tag{1.48}$$

Hubungan ini disebut aturan fasa (kaidah fasa Gibbs). Dalam Gb. 1.44 dari sistim satu komponen, $C=1$ dan $F=3-P$, jadi kalau $P=$a, $F=2$, tidak dapat merubah temperatur dan tekanan secara bebas menahan keadaan berfasa tunggal (luas bidang dibatasi oleh garis Oa, Ob dan Oc dalam gambar tsb). Kalau $P=2$, $F=1$, dan hanya temperatur atau tekanan dapat berubah bebas (garis Oa, Ob, dan Oc). Sebagai contoh kalau tekanan ditentukan temperatur dalam keadaan dua fasa akan tetap. Atau kalau temperatur berubah sedikit naik atau turun, salah satu fasa mungkin hilang. Kalau $P=3$, $F=0$ dan keadaan 3 fasa terbatas pada temperatur tetap dan tekanan tetap (titik O).

4.3 Diagram fasa dari dua komponen

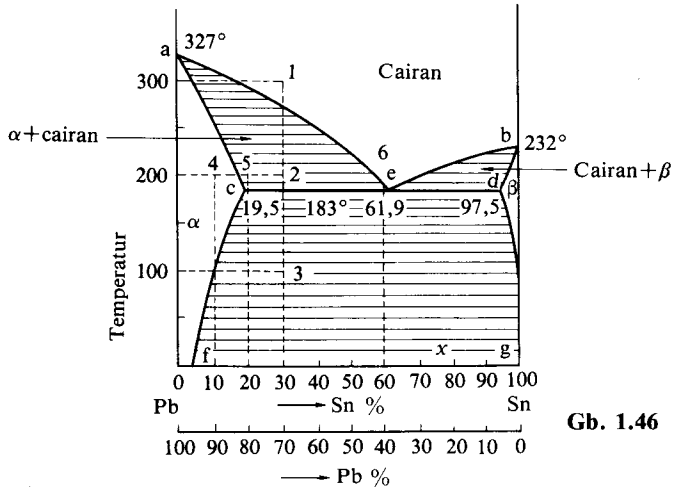
(1) Bagaimana menyatakan diagram fasa dua komponen

Dalam sistim dua komponen variabel dari keadaan adalah temperatur, tekanan dan komponen, jadi diperlukan tiga sumbu untuk menyatakan keadaan pada satu titik dalam ruang. Akan tetapi bagi bahan yang dipakai di industri yang umumnya berfasa padat dan tekanan uapnya sangat rendah, jadi keadaan gasnya dapat diabaikan. Dari Gb. 1.44 dan 1.45 temperatur keseimbangan fasa padat dengan fasa cair atau fasa padat dengan fasa padat menerima pengaruh kecil dari tekanan. Oleh karena itu dari ketiga variabel tersebut di atas tekanan dianggap tetap sehingga keadaan dapat dinyatakan dengan titik pada bidang dengan koordinat temperatur dan komponen. Aturan fasa dalam hal ini menjadi:

$$F=C=1-P \tag{1.49}$$

(2) Contoh diagram fasa dengan sistim dua komponen

Gb. 1.46 menunjukkan diagram paduan timah dan timbal. Sumbu mendatar dipergunakan sebagai sumbu komponen 100% timbal dan 0% timah pada di satu ujung, 100% timah dan 0% timbal di ujung lain. Dengan cara ini setiap komposisi dari komponen dapat dinyatakan oleh satu titik pada sumbu ini. Sebagai contoh, paduan 75% timbal adalah titik x dalam gambar tersebut. Titik 1 menyatakan keadaan paduan 70% timbal 30% timah pada 300°C yang merupakan fasa cair. Titik 2 menyatakan keadaan paduan yang sama pada 200°C yang terdiri dari kira-kria 55% fasa cair dan larutan padat α di mana larut dalam timbal. Titik 3 menyatakan keadaan paduan yang sama pada 100°C yang menunjukkan dua larutan padat α dan larutan padat β. Pada larutan padat β sedikit timbal larut dalam timah. Paduan 10% timah dan 90% timbal pada 200°C di titik 4 mempunyai fasa tunggal larutan padat α dan paduan 20% timah dengan 80% timbal pada titik 5 terdiri dari dua fasa yaitu larutan padat α dan cairan, dan paduan 60% timah dengan 40% timbal pada titik 6 hanya



Gb. 1.46 Diagram fasa sistim tumbal-timah putih.

mempunyai satu fasa yaitu cair. Di atas garis a e b hanya terdiri dari fasa cair, garis ini dinamakan garis cair. Di bawah garis acedb hanya terdapat fasa padat, garis ini disebut garis padat. Daerah yang dilingkungi oleh cf, dg terdiri dari fasa padat. Garis fc, dg menunjukkan batas larutan padat yang disebut garis larutan.

(3) Hubungan komposisi

Kalau dua fasa dari sistim dua komponen berada dalam keseimbangan, maka aturan fasa dapat dipergunakan pada sistim ini, $F=2+1-2=1$, jadi dari dua variabel yaitu komposisi dan temperatur, hanya satu variabel yang bebas, sebagai contoh kalau temperatur ditentukan maka komposisi dari dua fasa dalam keseimbangan secara spontan tetap.

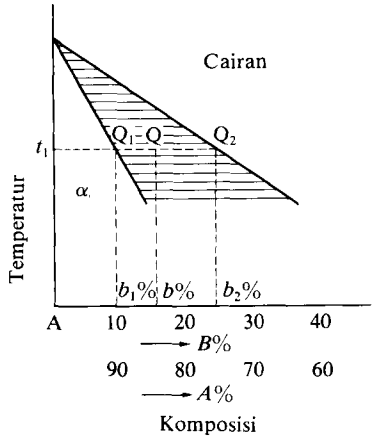
Dalam Gb. 1.46 garis ac dan cf menyatakan kelarutan jenuh timah dalam timbal sedangkan garis cair a e menyatakan kelarutan jenuh timbal dalam cairan. Selanjutnya daerah dua fasa dalam keseimbangan dalam gambar dinyatakan dengan garis-garis sejajar absis. Garis ini dinamakan garis penghubung di mana masing-masing fasa yang ada dalam keseimbangan pada suatu temperatur adalah fasa jenuh. Komposisi dari kedua fasa ditentukan oleh titik di kedua garis penghubung tersebut.

(4) Hubungan kuantitatif

Diagram fasa menyatakan komposisi, fasa yang seimbang dan juga berat kedua fasa kalau komposisi asal ditentukan.

Dalam Gb. 1.47 yang merupakan bagian dari Gb. 1.46 menyatakan sistim dua komponen dengan komposisi total b% B berada dalam keseimbangan pada temperatur t_1 di mana larutan padat α dengan komposisi b_1% B dan cairan dengan komposisi b_2% B berada bersama. Umpamakan jumlah berat adalah 100 g. dari jumlah itu x g adalah larutan padat α, berat dari cairan adalah $(100-x)$ g, dan dari hubungan antara bahan yang ada dalam keseimbangan persamaan di bawah dapat ditetapkan.

$$\underset{\text{(Volume B)}}{100\times\frac{b}{100}} = \underset{\substack{\text{(Volume B}\\ \text{dalam larutan}\\ \text{padat }\alpha)}}{x\frac{b_1}{100}} + \underset{\substack{\text{(Volume B}\\ \text{dalam cairan)}}}{(100-x)\frac{b_2}{100}} \qquad (1.5a)$$



Gb. 1.47 Pengristalan larutan padat oleh pendinginan.

dari persamaan di atas:

$$100b = b_1x + 100b_2 - b_2x \tag{1.50b}$$

$$x = \frac{100(b_2 - b)}{b_2 - b_2} \tag{1.50c}$$

Demikian juga:

$$\frac{x}{100-x} = \frac{\text{berat } \alpha}{\text{berat cairan}} = \frac{\dfrac{100(b_2-b_1)}{b_2-b_1}}{100-\dfrac{100(b_2-b_1)}{b_2-b_1}} = \frac{b_2-b}{b-b_1} = \frac{\overline{Q_2Q}}{\overline{QQ_1}} \tag{1.50}$$

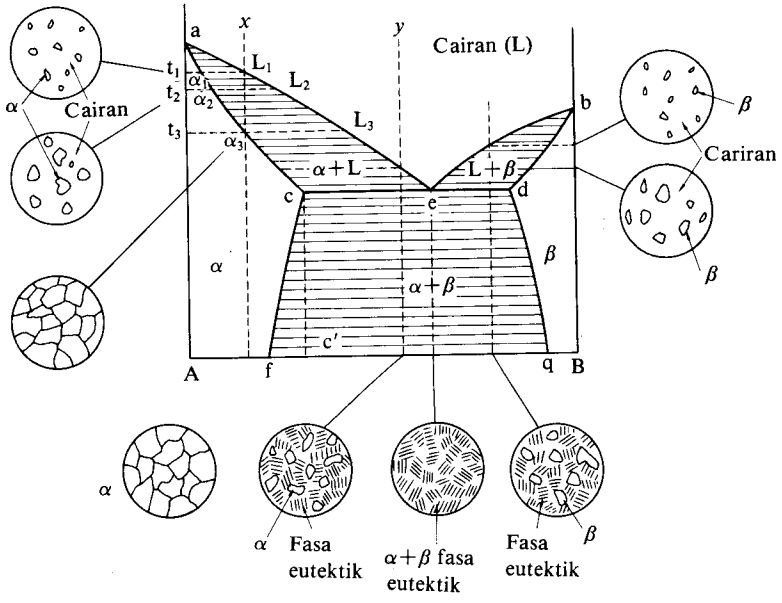
Ini merupakan hubungan seperti halnya pada tuas pengungkit atau timbangan di mana Q sebagai tumpuan. Panjang lengan QQ_1 dikalikan dengan berat α, sama dengan Q_2Q dikalikan dengan berat cairan, hubungan ini dinamakan hubungan tuas QQ_1 dan Q_2Q dapat dibaca dari sumbu komposisi. Kalau Q ada di tengah antara Q_1 dan Q_2, larutan padat α adalah 50% demikian juga cairan yang ada 50%. Kalau Q sama dengan Q_1 tidak ada cairan dan kalau Q sama dengan Q_2 tidak ada larutan padat α.

4.4 Perubahan fasa pada pendinginan

(1) Pembekuan larutan padat tunggal

Umpamakan keadaan *x* suatu cairan homogen dari sistim dua komponen A dan B. Kalau cairan ini didinginkan sangat perlahan-lahan ke temperatur yang lebih rendah, pendinginan ini mengikuti garis tegak melalui *x* seperti dilukiskan pada Gb. 1.48.

Pada L_1 atau di atasnya terdapat fasa cair, tetapi apabila temperatur diturunkan di bawah L_1 ke daerah dua fasa $\alpha+L$. L_1 adalah temperatur pembekuan di mana fasa α mulai mengristal. Larutan padat α mempunyai kadar A lebih tinggi dari pada cairan, jadi karena pengristalan α dari cairan, maka di dalam cairan kadar A menjadi rendah dan kadar B menjadi lebih tinggi. Cairan berkadar B lebih tinggi mempunyai temperatur pembekuan yang lebih rendah daripada cairan *x*, karena itu dari cairan ini tidak diharapkan terjadi kristalisasi α, dan selanjutnya agar terjadi kristal α temperatur harus diturunkan lebih rendah. Begitulah selanjutnya jumlah larutan padat bertambah dan jumlah cairan berkurang kalau temperatur diturunkan, sedangkan kadar B pada cairan terus meningkat mengikuti garis cair yang menuju e.



Gb. 1.48 Perubahan fasa selama pendinginan.

Jumlah relatif dari fasa α dan fasa cair dapat dilihat dari diagram fasa. Setelah mencapai temperatur t_3, tidak ada lagi cairan semuanya telah membeku menjadi satu fasa yaitu α_3.

Garis cair ae menyatakan permulaan kristalisasi dan garis beku ac menyatakan temperatur pembekuan di mana cairan membeku seluruhnya.

Pada sistim satu komponen pembekuan berakhir seluruhnya pada temperatur tetap, tetapi bagi sistim dua komponen pembekuan terjadi dalam satu daerah temperatur antara garis cair dan garis beku.

Hal serupa berlaku bagi cairan yang komposisinya dekat ke sisi komponen B di sini garis cair sebagai batas di mana mulai terjadi kristalisasi larutan padat β, dan garis beku merupakan batas di mana pembekuan terjadi seluruhnya.

(2) Pembekuan dengan reaksi eutektik

Selanjutnya umpamakan cairan mempunyai komposisi y di daerah cd. Kalau temperatur cairan diturunkan sampai pada garis cair ac maka larutan padat α mengristal, dan dengan pendinginan selanjutnya kristalisasipun berlajut dengan diikuti menurunnya jumlah cairan, jadi komposisi berubah di sepanjang garis ae. Tetapi berbeda dengan proses pembekuan komposisi x, kalau sampai pada temperatur cd komposisi cairan ini menjadi e sebelum cairan semua membeku. Titik e adalah titik potong dua garis cair, jadi cairan sampai pada titik ini mengristal menjadi larutan padat β dari komposisi d dan larutan padat α dari komposisi c secara simultan. Sifat khas dari kedua fasa padat yang mengristal simultan itu ialah merupakan struktur mikro yang halus berdekatan satu sama lain. Titik potong e tersebut dinamakan titik eutektik, dan perubahan cairan yang mempunyai komposisi e menjai larutan padat α dan β dinamakan reaksi eutektik yang dijelaskan sebagai berikut:

$$\text{Cairan e} \underset{\text{pemanasan}}{\overset{\text{pendinginan}}{\longleftrightarrow}} \left.\begin{matrix}\text{larutan padat } \alpha \\ \text{Komposisi c}\end{matrix} + \begin{matrix}\text{larutan padat } \beta \\ \text{Komposisi d}\end{matrix}\right\} \qquad (1.51)$$

Dalam reaksi eutektik ini ada tiga fasa berada bersama yaitu cairan e, larutan padat α komposisi c dan larutan padat β dari komposisi d, maka menurut aturan fasa $F=0$ sampai semua cairan e membeku menjadi α dan β. Temperatur ced tetap selama proses pembekuan terjadi. Temperatur ini dinamakan temperatur eutektik, ced juga merupakan garis beku.

Perubahan fasa padat setelah pembekuan selesai seluruhnya dapat dilihat dari diagram fasa. Cairan yang berkadar B lebih kecil dari f tetap berupa larutan padat α kalau didinginkan sampai temperatur kamar. Cairan yang komposisinya antara f dan c′ membeku menjadi α saja dan dengan penurunan temperatur selanjutnya memotong garis larut cf dan terjadi presipitasi larutan padat β dengan komposisi sesuai dengan titik pasangan dari titik potong tersebut di atas. (Perubahan dalam keadaan padat di sini dipergunakan istilah presipitasi sebagai pengganti kristalisasi). Kalau temperatur turun komposisi α berubah sepanjang garis cf dan β sepanjang garis dg. Hal ini berdasarkan prinsip yang sama dengan kristalisasi larutan padat dari cairan kalau memotong garis cair.

Gb. 1.48 menunjukkan contoh tambahan struktur dari sistim dua komponen A dan B selama pendinginan dan pada temperatur kamar.

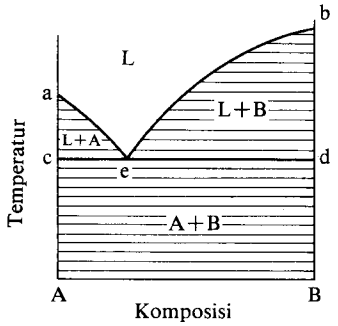
4.5 Diagram fasa dasar dari sistim dua komponen

(1) Larut sempurna dalam keadaan cair dan membentuk eutektik dengan kelarutan padat terbatas

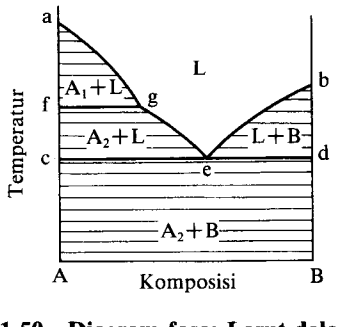
Sistim paduan timah-timbal adalah satu contoh dua komponen yang larut dalam keadaan cair dan masing-masing mempunyai kelarutan padat terbatas dan membentuk eutektik. Banyak sistim dua komponen yang mempunyai diagram fasa rumit, tetapi semuanya dapat dimengerti dengan mudah sebagai kombinasi dari diagram fasa dasar.

(2) Larut sempurna dalam keadaan cair dan membentuk eutektik dengan komponen murni

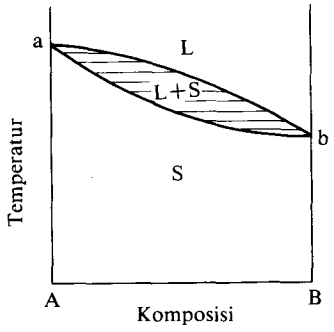
Dalam Gb. 1.48, A dan B mempunyai kelarutan padat terbatas satu terhadap yang lain. Tetapi apabila kelarutan padat tersebut menjadi sangat kecil, daerah fasa α dan fasa β menjadi sangat sempit dan garis padat berimpit dengan sumbu temperatur, menjadi diagram seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.49. Sedangkan pada Gb. 1.50



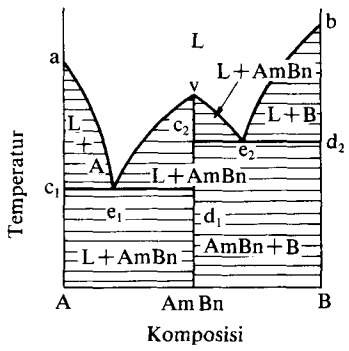
Gb. 1.49 Diagram fasa: Larut dalam keadaan cair pada setiap komposisi dan eutektik dengan komponen murni.



Gb. 1.50 Diagram fasa: Larut dalam keadaan cair pada setiap komposisi dan eutektik dengan komponen murni, dengan transformasi alotropik.



Gb. 1.51 **Diagram fasa: Larut sempurna dalam keadaan padat dan cair di setiap komposisi.**



Gb. 1.52 **Diagram fasa: Larut dalam keadaan cair di setiap komposisi dan senyawa dengan titik maksimum.**

menunjukkan adanya transformasi alotropi bagi A.

(3) Larut sempurna dalam keadaan cair dan dalam keadaan padat

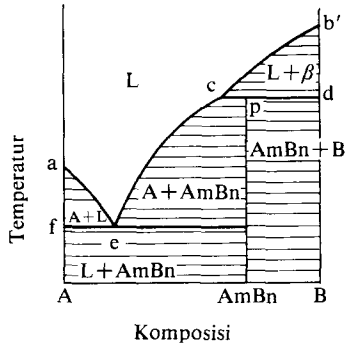
A dan B larut sempurna dalam keadaan cair dan dalam keadaan padat untuk setiap komposisi, yang dijelaskan pada Gb. 1.51

(4) Larut sempurna dalam keadaan cair dan mempunyai senyawa dengan titik maksimum

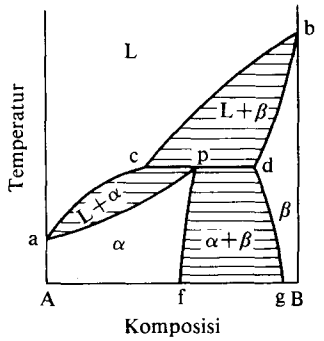
Kalau terdapat senyawa A_mB_n antara A dan B pada komposisi tertentu, maka sistem paduan dapat merupakan kombinasi antara A dengan B_mB_n dan antara A_mB_n dengan B. Gb. 1.52 menunjukkan kombinasi dari dua sistim dengan reaksi eutektik, yaitu cairan e_1 = fasa padat A + fasa A_mB_n dan cairan e_2 = fasa A_mB_n + fasa padat B.

(5) Larut sempurna dalam keadaan cair dan mempunyai senyawa dengan titik peritektik

Pada pemanasan kalau senyawa A_mB_n terurai pada temperatur di bawah titik cair, diagram fasanya seperti ditunjukkan dalam Gb. 1.53. Dalam gambar tersebut kalau



Gb. 1.53 **Diagram fasa: Larut dalam keadaan cair di setiap komposisi dan senyawa dengan titik peritektik.**



Gb. 1.54 **Diagram fasa: Larut dalam keadaan padat di setiap komposisi dan peritektik dengan kelarutan padat terbatas.**

cairan antara c dan d didinginkan, komposisi dari fasa cair mendekati c sepanjang garis cair dengan mengristalkan B (yang disebut kristal primer), setelah sampai pada garis cair cb. Kalau mencapai temperatur pada cpd, terjadi reaksi sebagai berikut.

$$\text{Cairan c} + \text{kristal primer B(d)} \rightarrow \text{Senyawa } A_mB_n \qquad (1.52)$$

Reaksi ini disebut reaksi peritektik. Reaksi ini seperti reaksi eutektik dari sistim komponen dan $F=0$, jadi temperatur tetap pada garis cpd sampai reaksi selesai. Reaksi terjadi pada batas antar muka dari kristal primer B dengan cairan c, dan lapisan senyawa A_mB_n terbentuk di sekitar kristal B karena itu disebut penyelubung atau reaksi peritektik. Apabila reaksi selesai, tinggal kelebihan B, kalau komposisi asal terletak di sebelah kanan titik p, dan tinggal kelebihan cairan kalau komposisi terletak di sebelah kiri p. Pada kasus kedua, cairan tersisa mengristal menjadi A_mB_n pada pendinginan selanjutnya, dan mencapai temperatur eutektik di mana terjadi reaksi eutektik dan pembekuan selesai.

(6) Larut sempurna dalam keadaan cair dan mempunyai peritektik dengan kelarutan terbatas

Apabila larutan padat terbentuk sebagai ganti senyawa oleh reaksi peritektik, diagram fasanya akan berbentuk seperti pada Gb. 1.54. Pada temperatur cpd reaksi terjadi sebagai berikut:

$$\text{Kristal primer } \beta\text{(d)} + \text{cairan c} \rightarrow \text{larutan padat } \alpha\text{(p)} \qquad (1.53)$$

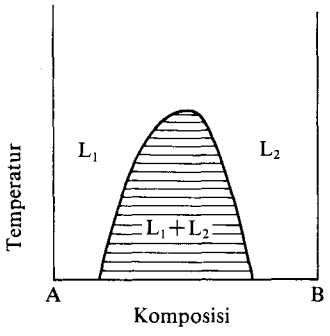
(7) Pemisahan dua fasa cairan

Kebanyakan sistim dua komponen larut sempurna dalam keadaan cair tetapi apabila fasa cair tidak larut, terpisah seperti air dengan eter, diagram fasanya seperti pada Gb. 1.55 atau Gb. 1.56. Gb. 1.56 menunjukkan satu contoh larut terbatas dalam keadaan cair dan mempunyai eutektik komponen murni. Di atas temperatur cmd cairan L_1 dan L_2 terpisah dari pada temperatur cmd cairan L_2 menunjukkan reaksi berikut:

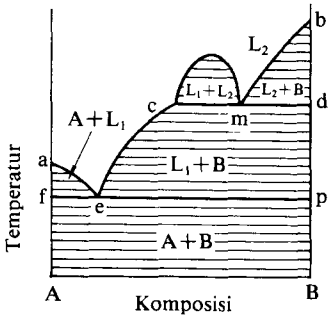
$$\text{Cairan } L_2\text{(m)} \rightarrow \text{Cairan } L_1\text{(c)} + \text{fasa padat (d)} \qquad (1.54)$$

(8) Berubah dalam keadaan padat setelah membeku

Pembekuan dari cairan sistim dua komponen telah dikemukakan di atas. Dengan cara yang sama perubahan dalam keadaan padat mudah dimengerti. Dalam hal ini



Gb. 1.55 Diagram fasa: Dua cairan yang terpisah.



Gb. 1.56 Diagram fasa: Dua cairan yang terpisah.

pengertian "larutan padat" sebagai pengganti pengertian "larutan cair" atau cairan, pengertian "presipitat" sebagai pengganti "pengristalan", "eutektoid" sebagai pengganti "eutektik" dan "peritektoid" sebagai pengganti peritektik dan sebagainya yang dipergunakan dalam diagram fasa.

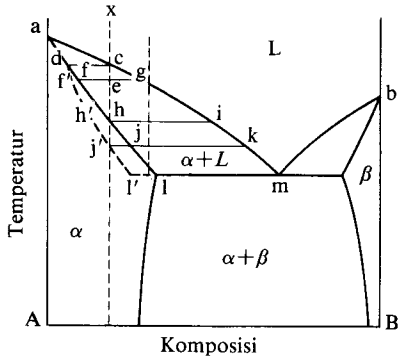
4.6 Keseimbangan dan difusi

Apabila suatu cairan pada komposisi x dalam Gb. 1.57 didinginkan sampai c, memotong garis cair terbentuk larutan padat α dengarn komposisi d seperti dijelaskan pada Gb. 1.58 (a) Pendinginan selanjutnya dengan $\Delta T°$ sampai e, akan terjadi pengristalan larutan padat α pada komposisi f mengelilingi larutan padat α yang terbentuk pada komposisi d atau terbentuk terpisah dari kristal yang ada. Untuk mencapai keseimbangan pada temperatur ini konsentrasi di sekelilingnya harus homogen karena difusi, menjadi komposisi f. Sebagai akibat dari penghomogenan ini komposisi fasa padat hanya dapat berada antara d dan f, jadi untuk mendapat fasa komposisi f agar seimbang dengan cairan g pada temperatur ini, maka B harus berdifusi dari cairan ke dalam fasa padat. Dengan difusi yang memadai, komposisi fasa cair berubah sepanjang garis cair dan komposisi fasa padat sepanjang garis f padat sampai pembekuan berakhir pada satu temperatur di garis padat. Sebaliknya kalau difusi tidak memadai, fasa padat e tidak homogen pada komposisi f, tetapi di tengah mempunyai komposisi d dan di sekitarnya komposisi f, dan komposisi rata-ratanya antara d dengan f atau f′. Demikian juga pada h menjadi h′. Jadi komposisi fasa padat x lebih kaya oleh A dari pada di garis cair, sehingga komposisinya ada dalam keseimbangan. Kalau temperaturnya mencapai titik h, menurut hubungan aturan tuas:

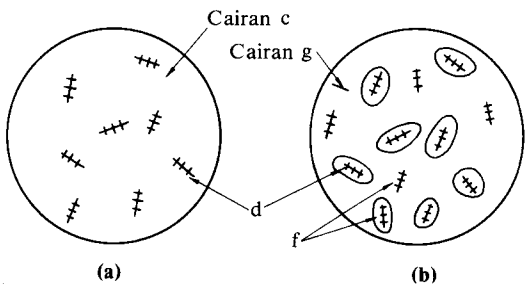
$$\frac{\text{Jumlah cairan}}{\text{Jumlah fasa padat}} = \frac{\text{h′h}}{\text{h′i}}$$

Jadi masih ada cairan. Maka kalau difusi pada fasa padat tidak cukup, temperatur pembekuan yang lengkap bagi cairan x akan lebih rendah dari pada garis padat h yaitu pada temperatur j′. Kalau struktur pada fasa padat yang sama tidak homogen, akan terjadi struktur inti, hal ini disebut segregasi.

Dibandingkan dengan difusi dalam keadaan cair, difusi dalam keadaan padat sangat lambat, jadi apabila laju pendinginan besar, gejala seperti diutarakan di atas sering terjadi dan temperatur pembekuan lengkap tidak pernah sesuai dengan garis



Gb. 1.57 Deviasi dari keseimbangan oleh pendinginan.



Gb. 1.58 Transformasi fasa dalam pembekuan Gb. 1.57.

padat pada diagram fasa. Sebagai contoh, bagi komposisi x yang mendekati l, cairan ini membeku sebagai fasa α sesuai dengan diagram fasa, tetapi pada kenyataan dapat terjadi reaksi eutektik, keadaan ini sering terjadi dalam praktek proses pembuatan komponen.

4.7 Fasa metastabil, keseimbangan metastabil

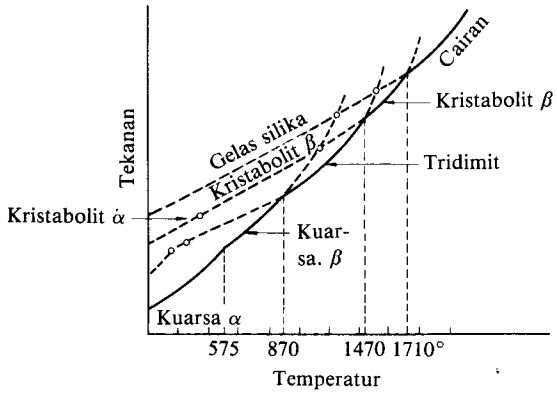
Diagram fasa menunjukkan hubungan fasa yang ada dalam keadaan kestabilan yang mantap. Kalau ada sesuatu yang berubah, mungkin ada fasa lain yang timbul pada keadaan akhir selain dari yang ditunjukkan pada keadaan keseimbangan diagram fasa. Kalau memang terjadi perlu diketahui perubahan tersebut.

Apabila air murni didinginkan, air akan mengristal menjadi es pada 0°C. Yang dapat dilihat pada Gb. 1.44. Tetapi seperti telah diketahui apabila air didinginkan lanjut di bawah 0°C dapat terjadi keadaan tidak membeku. Dengan pendinginan lebih lanjut atau memberikan stimulasi pada air dingin lanjut tersebut pembekuan dapat terjadi tiba-tiba. Keadaan serupa dapat terjadi terhadap transformasi fasa banyak. Fasa yang belum sempurna stabil dinamakan fasa metastabil. Mempelajari keadaan ini, sebagai contoh dalam hal air pada Gb. 1.44, kalau tekanan uap dari air dingin lanjut digambarkan pada grafik, maka akan berada pada garis perpanjangan dari kurva tekanan uap dari keadaan fasa stabil yang dinyatakan dengan oc'. Kurva oc' ini merupakan keseimbangan metastabil.

Seperti halnya air dingin lanjut, fasa metastabil dapat dilihat pada silika sebagai satu macam keramik yang penting. Pada Gb. 1.59 ditunjukkan bahwa dalam keadaan padat ada transformasi altropi yaitu kuarsa, tridimit, kristabolit, dst, perubahan yang saling tergantung juga menunjukkan fasa metastabil. Keseimbangan metastabil ditunjukkan oleh garis putus pada gambar tersebut.

Pembekuan dari cairan dan juga perubahan fasa padat, merupakan transformasi yang disebabkan oleh proses pengintian fasa baru dan proses pertumbuhan, jadi antar muka baru terbentuk antara fasa baru matriks. Karena energi tertentu diperlukan untuk membentuk antar muka tersebut, diperlukan pendinginan lanjut sampai sejauh tertentu agar terjadi pengintian.

Ada suatu aturan "apabila suatu sistim berubah, perubahan tidak berubah langsung dari keadaan kurang stabil ke keadaan paling stabil, tetapi bertahap, berubah pada keadaan metastabil dulu dan demikian berlanjut akhirnya sampai ke keadaan yang paling stabil". Aturan ini tidak selalu berlaku umum, tetapi sekurang-kurangnya mengatakan bahwa adanya keadaan metastabil adalah sangat biasa.



Gb. 1.59 Diagram fasa silika.

Terutama dalam hal perubahan fasa padat, di mana fasa metastabil cukup stabil pada temperatur biasa, maka transformasi ke fasa metastabil sangat lambat, hal ini sering memberikan arti yang penting dalam industri, sebagai contoh pengerasan presipitasi pada paduan, devitrifikasi pada gelas dan lain sebagainya.

4.8 Diagram fasa sistim tiga komponen

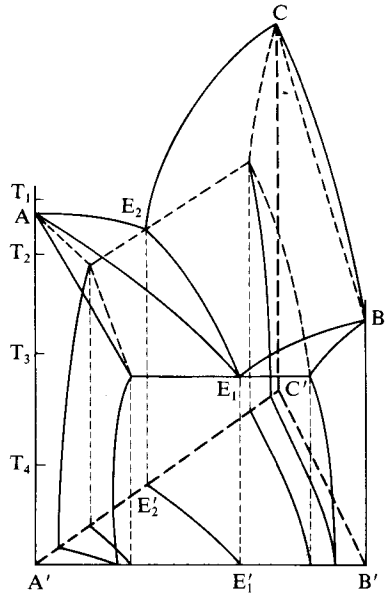
(1) Diagram fasa sistim tiga komponen

Bahan tidak selalu terdiri dari sistim dua komponen, sebagai contoh paduan tahan panas mempunyai 10 komponen. Bagi sistim komponen banyak tersebut diagram fasanya menjadi sangat rumit dan bentuk nyata yang memadai sukar diperoleh. Dari sistim komponen banyak yang rumit tersebut, sistim tiga komponen dipandang masih lebih sederhana.

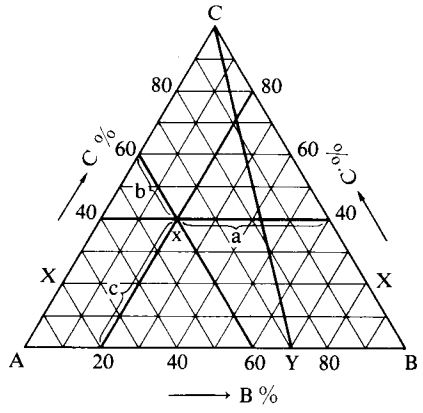
Gb. 1.60 menunjukkan contoh diagram fasa sistim tiga komponen . Diagram fasa tiga komponen A-B-C didasarkan kepada diagram fasa sistim dua komponen. Sistim dua komponen sering disebut sistim biner sistem tiga komponen disebut sistim terner dan seterusnya. Dalam gambar, diagram dua komponen dari A-B dan A-C membentuk diagram fasa dari komponen yang larut sempurna dalam keadaan cair dan mempunyai eutektik dengan kelarutan padat yang terbatas, dan sistim dua komponen B-C membentuk diagram fasa yang komponennya larut sempurna dalam keadaan cair dan larut sempurna dalam keadaan padat. Segitiga sama sisi sebagai dasar, dinamakan segitiga komposisi, satu titik padanya menyatakan komposisi dari 3 komponen tersebut, dengan memberikan temperatur sebagai ordinat maka terbentuk gambar tiga dimensi.

(2) Menyatakan komposisi sistim terner

Semua komposisi dari sistim biner dinyatakan dengan titik pada garis alas antara titik 100% A-0% B di satu ujung dan titik 0% A-100% B di ujung lain, tetapi pada



Gb. 1.60 Diagram fasa sistim tiga komponen (terner).



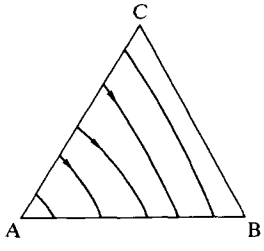
Gb. 1.61 Komposisi diagram fasa terner.

sistim terner seperti dijelaskan dalam Gb. 1.61 semua komposisi dari sistim ini dinyatakan oleh titik dalam segitiga sama sisi yang titik sudutnya merupakan 100% komponen. Jumlah panjang garis a, b dan c yang ditarik dari titik *x* masing-masing sejajar dengan sisi segitiga itu, sama dengan panjang satu sisi yang dapat menyatakan 100%. Oleh karena itu panjang a, b dan c masing-masing dapat menyatakan prosentase komponen A, B dan C. Hal itu serupa dengan hubungan tuas pada sistim biner, karena *x* sebagai tumpuan tuas a, b dan c dengan masing-masing komponen A B dan C yang menyeimbangkan. Dari penjelasan di atas, komposisi sistim di mana komposisi satu komponen tetap umpamanya A 20%, maka komposisi A dan C yang berubah dapat dinyatakan pada garis XX yang sejajar dengan AC. Selanjutnya komposisi sistim di mana perbandingan A dan B tetap umpamanya 30: 70 dan hanya C yang berubah dapat dinyatakan oleh garis lurus CY.

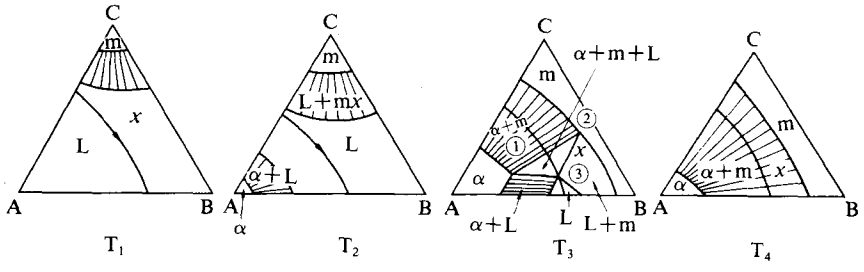
(3) Diagram fasa yang diproyeksikan, diagram fasa temperatur tetap dan diagram fasa potongan.

Diagram fasa terner merupakan bentuk tiga dimensi seperti dijelaskan pada Gb. 1.60. Berbagai kurva yang tercantum pada gambar tiga dimensi itu diproyeksikan pada segitiga komposisi seperti dijelaskan pada Gb. 1.62. Dari gambar tersebut dapat diperoleh hubungan kuantitas.

Gb. 1.63. adalah diagram temperatur tetap diperoleh dari Gb. 1.60 yang dipotong oleh bidang temperatur tetap, dari diagram tersebut keadaan setiap komposisi pada temperatur yang bersangkutan dapat diketahui. Suatu paduan yang terdiri dari *x* adalah cair pada T_1 dan mempunyai keseimbangan dua fasa yaitu cairan dan larutan padat m pada T_2 dan T_3. Yang masing-masing dinyatakan oleh kedua ujung garis penghubung yang melalui *x* dan besarnya ditentukan oleh aturan tuas. Pada temperatur T_3, fasa $\alpha+L+m$ berada dalam keseimbangan, komponen masing-masing dinyatakan dengan cara seperti yang telah dijelaskan di atas. Pada temperatur T_4 ter-



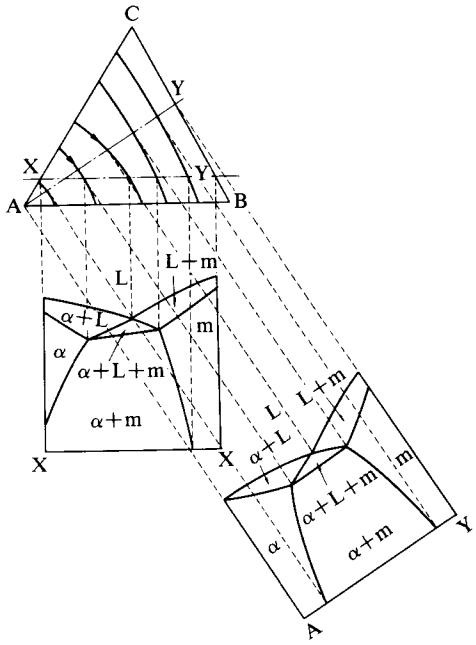
Gb. 1.62 Diagram fasa diproyeksikan dari Gb. 1.60.



Gb. 1.63 Potongan diagram fasa Gb. 160 pada temperatur T_1-T_4.

diri dari $\alpha+m$, dan masing-masing komponen dinyatakan pada kedua ujung dari garis penghubung.

Gb. 1.64 merupakan potongan diagram fasa yang menunjukkan perubahan temperatur kalau dipotong oleh bidang yang tegak lurus pada segitiga komposisi, dari diagram tersebut perubahan karena temperatur serupa seperti halnya pada diagram sistim biner. Tetapi perlu diperhatikan bahwa dari diagram potongan ini komposisi dan kuantitas tidak dapat diperoleh seperti pada keseimbangan dua fasa.



Gb. 1.64 Potongan diagram fasa dari Gb. 1.60 menurut komposisi.

BAGIAN II

BAHAN-BAHAN LOGAM

1 BESI DAN BAJA

1.1 Struktur mikro besi dan baja

Besi dan baja paling banyak dipakai sebagai bahan industri yang merupakan sumber sangat besar, dimana sebagian ditentukan oleh nilai ekonominya, tetapi yang paling penting karena sifat-sifatnya yang bervariasi. Yaitu bahwa bahan tersebut mempunyai berbagai sifat dari yang paling lunak dan mudah dibuat sampai yang paling keras dan tajampun untuk pisau pemotong dapat dibuat, atau apa saja dengan bentuk apapun dapat dibuat dengan pengecoran. Dari unsur besi berbagai bentuk struktur logam dapat dibuat, itulah sebabnya mengapa besi dan baja disebut bahan yang kaya dengan sifat-sifat. Pembahasan dimulai dengan struktur mikro dari besi dan baja, di mana unsur paduan utamanya adalah karbon.

(1) Diagram fasa besi-karbon

Gb. 2.1 menunjukkan diagram keseimbangan besi-karbon sebagai dasar dari bahan yang berupa besi baja. Selain karbon pada besi dan baja terkandung kira-kira 0,25% Si, 0,3–1,5% Mn dan unsur pengotor lain seperti P, S, dsb. Karena unsur-unsur ini tidak memberikan pengaruh utama kepada diagram fasa, maka diagram fasa tersebut dapat dipergunakan tanpa menghiraukan adanya unsur-unsur tersebut.

Pada paduan besi karbon terdapat fasa karbida yang disebut sementit dan juga grafit, grafit lebih stabil daripada sementit. Pada besi cor kestabilan tersebut merupakan pertanyaan, hal ini akan dibahas kemudian. Yang akan dibahas di sini hanyalah diagram Fe–Fe_3C (sementit mempunyai kadar C=6,67%). Titik-titik penting pada diagram fasa ini adalah:

A: Titik cair besi

B: Titik pada cairan yang ada hubungannya dengan reaksi peritektik.

H: Larutan padat δ yang ada hubungan dengan reaksi peritektik. Kelarutan karbon maksimum adalah 0,10%.

J: Titik peritektik. Selama pendinginan austenit pada komposisi J, fasa γ terbentuk dari larutan padat δ pada komposisi H dan cairan pada komposisi B.

N: Titik transformasi dari besi $\delta \rightleftarrows$ besi γ, titik transformasi A_4 dari besi murni.

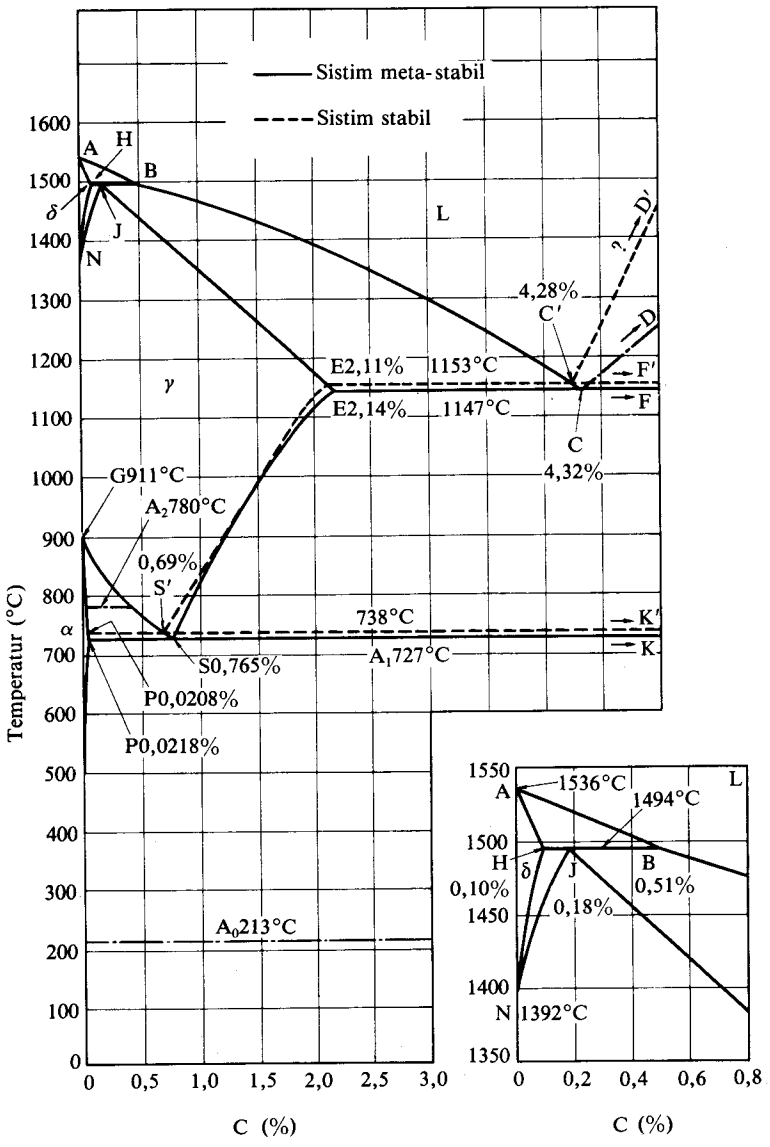
C: Titik eutektik. Selama pendinginan fasa γ dengan komposisi E dan sementit pada komposisi F (6,67% C) terbentuk dari cairan pada komposisi C. Fasa eutektik ini disebut ledeburit.

E: Titik yang menyatakan fasa γ, ada hubungan dengan reaksi eutektik. Kelarutan maksimum dari karbon 2,14%. Paduan besi karbon sampai pada komposisi ini disebut baja.

G: Titik transformasi besi $\gamma \rightleftarrows$ besi α. Titik transformasi A_3 untuk besi.

P: Titik yang menyatakan ferit, fasa α, ada hubungan dengan reaksi eutektoid. Kelarutan maksimum dari karbon kira-kira 0,02%.

S: Titik eutektoid. Selama pendinginan, ferit pada komposisi P dan sementit



Gb. 2.1 Diagram keseimbangan besi-karbon.

pada komposisi K (sama dengan F) terbentuk simultan dari austenit pada komposisi S. Reaksi eutektoid ini dinamakan transformasi A_1, dan fasa eutektoid ini dinamakan perlit.

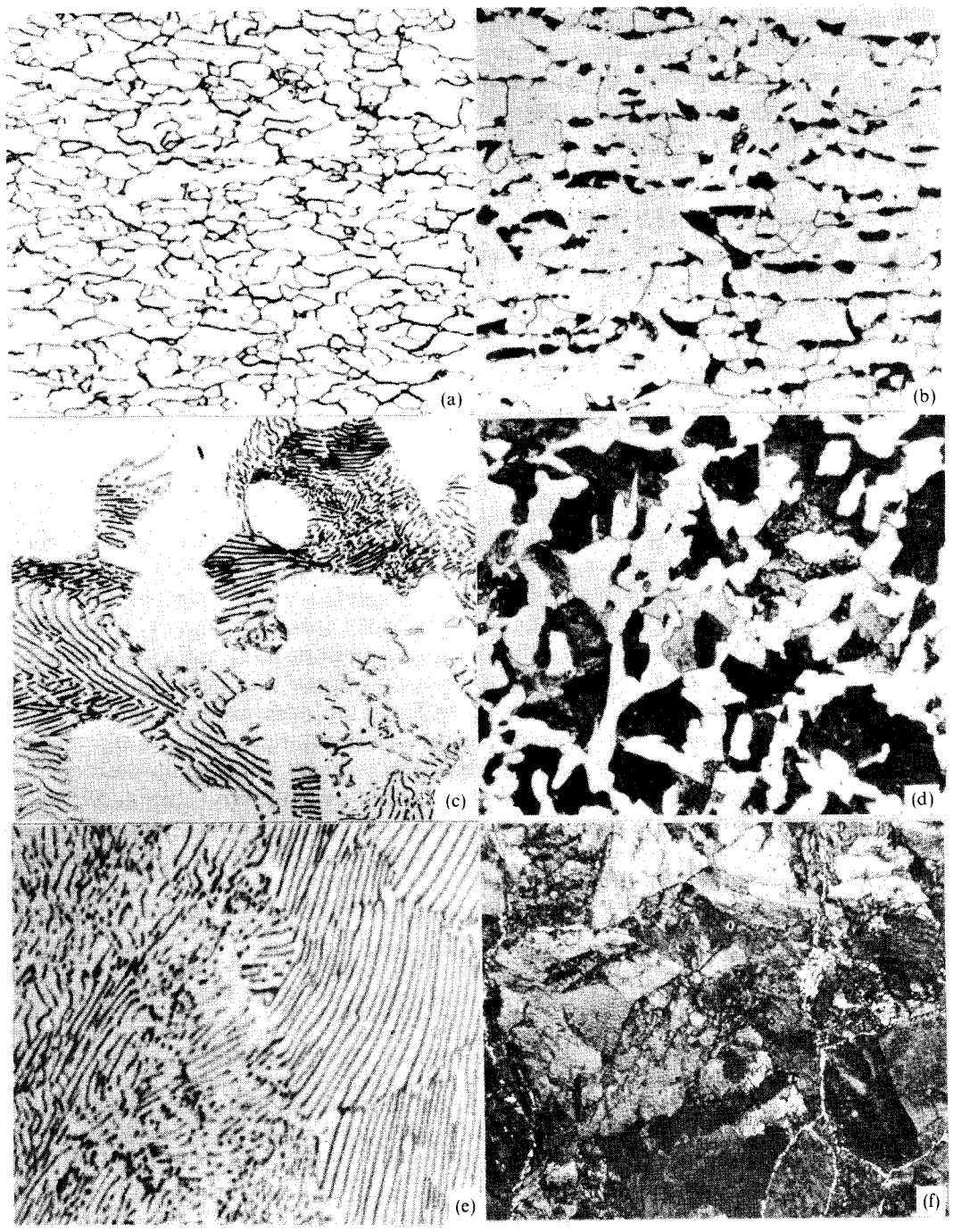
GS: Garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dan komposisi, di mana mulai terbentuk ferit dari austenit. Garis ini disebut garis A_3.

ES: Garis yang menyatakan hubungan antara temperatur dan komposisi; di mana mulai terbentuk sementit dari austenit, dinamakan garis A_{cm}.

A_2: Titik transformasi magnetik untuk besi atau ferit.

A_0: Titik transformasi magnetik untuk sementit.

Baja yang berkadar karbon sama dengan komposisi eutektoid dinamakan baja eutektoid, yang berkadar karbon kurang dari komposisi eutektoid disebut baja hipoeutektoid, dan yang berkadar karbon lebih dari komposisi eutektoid disebut baja



Gb. 2.2 Struktur mikro baja karbon. a: 0,06%C, besar butir medium (ASTM No. 7)×100; b: 0,25%C baja dinormalkan pada 930°C×500; c: 0,30%C baja diaustenitkan pada 930°C ditransformasikan isotermal pada 700°C, ferit dan perlit kasar×1000; d: 0,45%C baja dinormalkan pada 840°C, ferit dan perlit×500; e: 0,80%C baja diaustenitkan pada 1150°C, didinginkan di tungku×2000; f: 1,0%C baja dirol panas pada 1050°C, pendinginan udara, matriks perlit, sementit pada batas butir (garis putih)×500.

a: Dituakan pada 150°C selama 30 menit, zona GP (1) 200.000 kali.

b: Dituakan selama 48 jam, zona GP (2) 200.000 kali.

hipereutektoid. Gb. 2.2 menunjukkan struktur mikro baja apabila baja didinginkan perlahan-lahan dari 50–100°C di atas garis GS (A_3) dan garis SE (A_{cm}) pada Gb. 2.1 Pada baja eutektoid transformasi terjadi pada titik tetap S, menjadi struktur yang disebut perlit. Pada baja hipoeutektoid terbentuk fasa ferit mendekati besi murni yang komposisinya sama dengan P dan perlit, sedangkan pada hiper eutektoid terbentuk perlit dan sementit pada batas butir.

(2) Perubahan struktur pada perlakuan panas

Besi dan baja diharapkan mempunyai kekuatan statik dan dinamik, ulet, mudah diolah, tahan korosi dan mempunyai sifat elektromagnet agar dapat dipakai sebagai bahan untuk konstruksi dan mesin-mesin. Dilihat dari transformasi ada tiga macam baja yaitu:

1) Baja dengan titik transformasi A_1, berupa ferit di bawah A_1, dan austenit pada A_3 atau di atas A_1.
2) Baja dengan titik transformasi A_1 di bawah temperatur kamar, berupa austenit pada temperatur kamar.
3) Baja dengan daerah austenit yang kecil, berupa ferit sampai temperatur tinggi pada daerah komposisi tertentu.

Baja yang tergolong macam 1) berupa ferit pada temperatur kamar (dalam keseimbangan), dapat diproses menjadi berbagai struktur dengan jalan perlakuan panas. Struktur tersebut diikhtisarkan pada Table 2.1. Fasa-fasa tersebut memiliki sifat-sifat khas. Ferit mempunyai sel satuan kubus pusat badan atau *body centered cubic* (*bcc*), menunjukkan titik mulur yang jelas dan menjadi getas pada temperatur rendah. Austenit mempunyai sel satuan kubus pusat muka atau *face centered cubic* (*fcc*) menunjukkan titik mulur yang jelas tanpa kegetasan pada keadaan dingin. Akan tetapi kalau berupa fasa metastabil bisa berubah menjadi α' pada temperatur rendah dengan pengerjaan. Martensit adalah fasa larutan padat lewat jenuh dari karbon dalam sel satuan tetragonal pusat badan atau *body centered tetragonal* (*bct*). Makin tinggi derajat kelewat jenuhan karbon, makin besar perbandingan satuan sumbu sel satuannya dan makin keras serta makin getas mertensit tersebut. Bainit mempunyai sifat-sifat antara martensit dan ferit.

Sesuai dengan keaneka ragaman strukturnya, maka dapat diperoleh berbagai

Tabel 2.1 Fasa yang ada pada baja.

	Fasa dan simbol	Struktur	Pengelasan
Menurut kristal	Austenit (γ)	*fcc*	Paramagnetik dan stabil pada temperatur tinggi.
	Ferit (α)	*bcc*	Stabil pada temperatur rendah, kelarutan padat terbatas, dapat berada bersama Fe_3C (*sementit*) atau lainnya.
	Bainit (α)	*bcc*	Austenit metastabil didinginkan dengan laju pendinginan cepat tertentu. Terjadi hanya presipitasi Fe_3C, unsur paduan lainnya tetap larut.
	Martensit (α')	*bct*	Fasa metastabil terbentuk dengan laju pendinginan cepat, semua unsur paduan masih larut dalam keadaan padat.
Menurut keadaan	Perlit		Lapisan ferit dan Fe_3C.
	Widmanstaetten		γ dan α dalam orientasi pada persipitasi ferit.
	Dendrit		Berbentuk cabang-cabang seperti pohon, struktur ini terbentuk karena segregasi karbon pada pembekuan.
	Sorbit		Sorbit adalah perlit halus dan trostit adalah bainit. Nama ini tidak banyak dipakai.
	Trostit		

Catatan: *fcc*=face centered cubic
bcc=body centered cubic
bct=body centered tetragonal.

sifat baja termasuk kekuatan dan keuletan. Faktor-faktor yang menentukan sifat-sifat mekanik adalah macam fasa, kadar unsur paduan dalam fasa, banyak fasa, ukuran dan bentuk senyawa. Untuk mendapatkan sifat-sifat mekanik yang diinginkan perlu mendapat struktur yang cocok dengan komposisi kimia dan perlakuan panas yang tepat.

1.2 Baja karbon rendah bentuk pelat

Baja karbon rendah merupakan produk yang utama dalam produksi besi dan baja, dan pelat tipis dibuat melalui berbagai cara sebagai bahan peralatan dapur. Pelat tebal dipakai untuk jembatan dan konstruksi, sekarang dipakai baja yang telah diperkuat untuk menghemat, hal ini dijelaskan pada paragraf 1.4. Di bawah ini hanya akan dibicarakan tentang pelat tipis.

1.2.1 Struktur dan mampu bentuk baja pelat tipis

Penggunaan utama baja pelat tipis yang dirol panas, dilunakkan, dirol dingin dan dilunakkan adalah untuk benda yang dibentuk dengan pres. Pembentukan dengan pres terdiri dari pengguntingan dan pembentukan, di mana pengepresan merupakan proses utama. Di samping kekuatan mulur, sifat-sifat lainpun penting yaitu regangan pada titik mulur, kekuatan tarik, regangan uniform dan regangan setempat yang didapat dari pengujian tarik biasa, eksponen pengerasan regangan (n) dan perbandingan regangan plastis (r). Makin besar n berarti makin baik mampu-bentuknya. Pada baja pelat dirol dingin umumnya $n=0{,}18$–$0{,}25$.

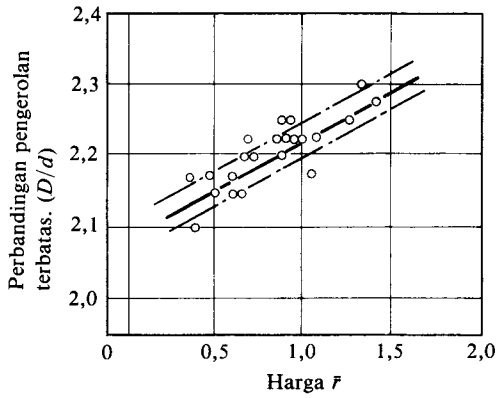
Pembuatan bejana berbentuk silinder dari bahan bulat tipis atau *blank* adalah contoh umum proses pembentukan dengan pres dari pelat tipis, di mana bahan menerima deformasi tarik pada arah radial oleh regangan kompresi arah melingkar. Dalam tahun 1950 Lankford dkk, mengemukakan evaluasi mampu bentuk pada deformasi di atas mempergunakan r yaitu perbandingan regangan antara arah lebarnya ε_ω dan arah tebalanya ε_t di daerah perpanjangan uniform,

$$r=\varepsilon_\omega/\varepsilon_t=\ln(\omega_0/\omega_f)/\ln(t_0/t_f) \tag{2.1}$$

Untuk memperbaiki mampu bentuk pres baja pelat rolan dingin hanya perlu mempertimbangkan bagaimana memperbesar harga r.

Gb. 2.3 menunjukkan hubungan antara $\bar{r}$ dengan perbandingan penarikan terbatas (D/d) yang maksimum tanpa retak apabila cawan silindris berdiameter d dibuat dengan penarikan dalam (*deep drawing*) dari bahan bulat tipis diameter D. $\bar{r}$ menyatakan harga rata-rata r hasil pengujian tarik pada beberapa sudut terhadap arah pengerolan pelat. Hubungan antara $\bar{r}$ dengan perbandingan penarikan terbatas merupakan garis lurus, menunjukkan mampu bentuk yang lebih baik pada $\bar{r}$ besar.

Bahan isotropik mempunyai $r=1$. Apabila r bukan 1 berarti bahwa bahan mempunyai sifat anisotropik. Sejak tahun 1958 ketika hubungan antara r dengan tekstur pelat diketahui dan bahwa pelat tipis diketahui mempunyai r, banyak studi dilakukan mengenai teknik produksi dengan memberikan tekstur pada bahan logam. Tekstur tidak dapat diamati pada struktur mikro tetapi hanya dengan teknik difraksi sinar X. Lambat laun jelas bahwa harga γ suatu pelat ada, di mana sebanyak mungkin bidang-bidang {1 1 1} besi α mengarah sejajar bidang rolan, hal ini adalah kenyataan yang diketahui sampai saat ini. Kalau bidang {1 0 0} yang sejajar dengan bidang rolan bertambah, maka harga r menjadi kecil. Harga r lebih tinggi untuk baja mati (*killed*

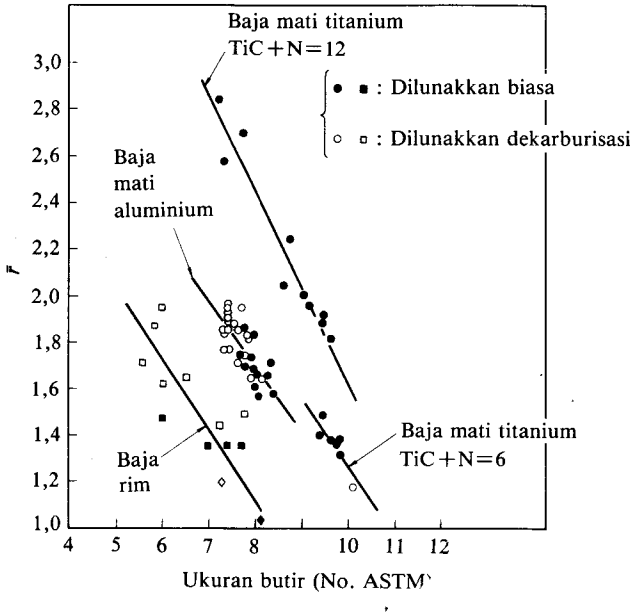


Gb. 2.3 Hubungan antara $\bar{r}$ baja pelat tipis dengan perbandingan penarikan terbatas pada pengujian pembentukan cawan (*D*: diameter bahan, *d*: diameter cawan). $\bar{r}=(r_{0°}+2r_{45°}+r_{90°})/4$; $r_{0°}$, dst: adalah sudut dengan arah pengerolan. (R. L. Whitely: Trans. ASM 52).

steel). Dalam hal pengerolan panas dengan waktu sesingkat mungkin dalam daerah presipitasi AlN (nitrida Aluminium) 650–1200 °C, dirol dingin dengan reduksi besar 65–80%, kemudian dilunakkan dan terjadi presipitasi homogen butir halus AlN, maka mungkin mendapat lebih banyak bidang-bidang {1 1 1} sejajar dengan bidang pelat. besarnya reduksi pada *r* maksimum berubah menurut kadar karbon.

1.2.2 Pemilihan pelat baja tipis dengan mampu bentuk baik

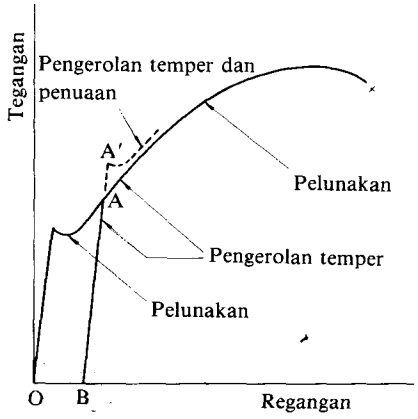
Ukuran butir memberikan pengaruh jelas pada harga *r*. Gb. 2.4 menunjukkan suatu contoh hasil pengujian. Makin kecil nomor ukuran butir makin besar butir



Gb. 2.4 Hubungan antara harga $\bar{r}$ dengan ukuran butir. (D. A. Karlyn, R. W. Vieth, J. L. Forand: J. Kubodera, Formability of sheet, Iron and steel Inst., Japan, The Ninth Nishiyama Memorial Course (1960), 5)

kristal jadi makin tinggi harga r kalau ukuran butir makin besar. Harga r secara berurutan makin besar, untuk baja rim, baja mati aluminium dan baja mati titanium. Makin besar ukuran butir makin kecil kekuatan mulur, jadi bukan hanya harga r saja tetapi juga harga n cenderung menjadi lebih baik, namun bila ukuran butir menjadi sangat besar, pada pembentukan terjadi pengasaran permukaan, disebut kulit jeruk, maka dari itu perlu ukuran butir yang cocok.

Pada penarikan dalam pelat baja tipis, menghasilkan titik mulur berbentuk pola tertentu yang disebut regangan pembentang (*stretcher strain*), Jadi pelat baja tipis bagi proses penarikan diolah lebih dulu dengan pengerolan ringan setelah pelunakan, yang disebut pengerolan temper (*temper rolling*). Gambaran skematik keadaan tersebut pada pengujian tarik ditunjukkan dalam Gb. 2.5. Keadaan pengerolan temper yang serupa dengan titik A yaitu titik B. Kalau bahan B diuji tarik, terjadi pemuluran pada titik A tanpa menyebabkan perpanjangan pada titik mulur, jadi tidak perlu khawatir akan terjadinya regangan. Tetapi kalau bahan tersebut dibiarkan bertahan untuk jangka waktu yang lama maka terjadi suatu fenomena yang dinamakan pengerasan presipitasi karena regangan, dan karena kekuatan mulur A′ meningkat dan juga terjadi perpanjangan. Hal ini tidak pernah terjadi pada baja yang dimatikan oleh aluminium dan titanium. Harga r dan n sangat dipengaruhi oleh pengerolan temper ini.



Gb. 2.5 Pengerolan temper.

Maksud dari pengerolan temper ini bukan hanya untuk meniadakan perpanjangan pada titik mulur tetapi juga untuk meluruskan bentuk dari lembaran setelah dilunakkan dan menghaluskan permukaan produk.

Lembaran baja yang tipis yang dapat dibentuk secara baik maksimum mengandung 0,18% karbon, tetapi karena kadar karbon membuat harga r menurun, sebaiknya kadar karbon diturunkan sampai kira-kira 0,03% dan menurunkan ketakmurnian yang menyebabkan inklusi S dan O. Sesuai dengan itu kekuatan tarik dipertahankan sampai paling tinggi 40 kgf/mm^2. Sebagai contoh, lembaran baja yang dipakai untuk keperluan pembuatan mobil dibuat lebih kuat agar menjadi lebih ringan untuk menghemat bahan bakar. Dengan kadar C, Mn dan sebagainya, yang lebih tinggi dan menambahkan sedikit Cr atau lainnya yang didinginkan secara cepat dari fasa $\alpha+\gamma$ untuk membuat fasa dari α dan bainit, dan dilunakkan pada 250–400°C. Jadi baja lembaran tipis dengan harga n dan r tinggi dan kekuatan yang tinggi kira-kira 60 kgf/mm^2 sedang dikembangkan.

1.3 Baja pelat yang dirol panas dan baja kekuatan tinggi

Lembaran baja setelah dirol panas mempunyai sifat-sifat yang mudah dibentuk dan mudah dilas. Dilihat dari cara pembuatan baja, pengerolan pelat adalah proses yang sangat efisien dan sangat ekonomis, oleh karena itu ada satu kecenderungan bahwa lambat laun struktur, konstruksi baja dibuat dari pelat yang dirol dengan mempergunakan teknik pengelasan. Ada berbagai macam bahan seperti baja untuk cetakan, pipa-pipa dan sebagainya, dapat juga dibuat dengan jalan yang sama.

1.3.1 Kekuatan dan keuletan baja pada temperatur rendah

Penggunaan baja yang paling utama, bagi baja yang telah dirol panas ditambah proses celup dingin dan ditemper, adalah untuk konstruksi baja yang memerlukan keuletan yang tinggi pada temperatur kamar atau temperatur yang lebih rendah. Pada dasarnya dalam hal ini diperlukan butir kristal yang halus seperti telah dikemukakan pada Bagian I.

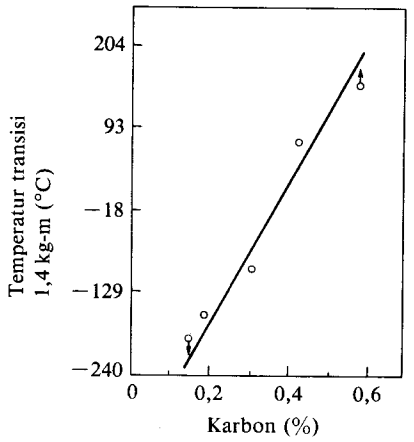
Karbon adalah unsur yang paling utama untuk menguatkan baja, sehingga baja harus mengandung karbon sampai kadar tertentu, tetapi kalau kadar karbon meningkat, sangat meningkatkan temperatur transisi seperti ditunjukkan pada Gb. 2.6, yang diinginkan selalu lebih rendah. Tetapi apabila ditinjau dari mampu las, kadar karbon harus dikontrol sampai batas tertentu.

Banyak sekali studi telah dilakukan untuk mengetahui pengaruh unsur paduan terhadap keuletan baja pada temperatur rendah. Dalam hal ini disimpulkan bahwa C, P, Mo dan V adalah unsur-unsur yang menurunkan keuletan sedangkan Ni dan Mn adalah unsur-unsur yang memperbaiki keuletan itu.

Mn mengurangi karbida dan menurunkan temperatur transformasi, yang membuat perlit dan ferit menjadi berbutir halus juga memperbaiki keuletan, sejalan dengan itu perbandingan dari Mn/C dibuat lebih tinggi untuk memperbaiki keuletan pada temperatur rendah.

P memperburuk kegetasan pada temperatur rendah dan meningkatkan sensitivitas dari kegetasan temper karena fasa yang tersegregasikan pada batas butir, oleh karena itu P harus selalu minimum.

S adalah suatu unsur yang membentuk inklusi dan tidak memberikan banyak



Gb. 2.6 Hubungan antara kadar karbon dan temperatur transisi dari baja Ni-Cr yang dicelup dingin dan ditemper. (R. H. Aborn, Trans. A. S. M. *48* (1956), 51)

pengaruh terhadap temperatur transisi tetapi menurunkan keuletan matriks, atau menurunkan keuletan pada arah tegak lurus terhadap arah pengerolan sebab inklusi tersebut memanjang pada arah pengerolan.

Ni bersama-sama Mn, adalah unsur yang sangat efektif untuk memperbaiki keuletan pada temperatur rendah. Ia meningkatkan keuletan dari matrix ferit dan sekaligus memberikan pengaruh yang baik pada penghalusan butir. Baja yang dipergunakan untuk keperluan pada temperatur rendah dengan komposisi dasar yaitu 1,5% Ni, 3,5% Ni, 6% Ni, 9% Ni, telah dikembangkan pada temperatur pemakaian.

Mo dan W adalah unsur yang efektip untuk mengendalikan kegetasan temper. Penambahan yang cocok yang biasa diminta adalah 0.3%–0,5%.

Kadar N meningkatkan sensitivitas terhadap pengerasan presipitasi karena regangan, seharusnya N rendah, dan sebaiknya kadar O rendah karena menyebabkan kegetasan pada batas butir.

1.3.2 Mampu las baja

Konstruksi baja biasanya dibuat dengan jalan mengelas, untuk itu diperlukan lembaran baja yang tebal agar mempunyai mampu las yang baik. Tidak dapat dihindari bahwa bahan berubah sifatnya disebabkan karena panas pada waktu pengelasan. Jadi di daerah pengelasan atau di daerah yang dipengaruhi oleh panas bisa terjadi pengerasan atau retakan. Derajat dari kesukaran, apakah sambungan lasan dapat memuaskan dan apakah konstruksi yang dibuat dengan jalan pengelasan dapat memenuhi maksud yang diinginkan, dinamakan mampu las. Hal yang penting, terutama terjadinya retakan atau terjadinya pengerasan atau juga turunnya keuletan pada sambungan las.

Antar muka antara logam penyambung dan logam induk pada daerah pengelasan dinamakan bagian pengikat, dan selanjutnya daerah yang dipengaruhi panas dari logam induk adalah daerah yang terpanaskan pertama pada temperatur yang tinggi terdinginkan secara cepat, yang menyebabkan daerah itu terjadi lebih keras. Kekuatan maksimum pada daerah ini tergantung pada kadar karbon ekivalen. IIW (International Institute of Welding) menyatakan karbon ekivalen sebagai berikut:

$$C_{ek}(\%)=C+(1/6)Mn+(1/5)(Cr+Mo+V)+(1/15)(Cu+Ni) \tag{2.2}$$

Hubungan antara kekerasan Vickers maksimum H_{Vmaks} dengan karbon ekivalen adalah sebagai berikut,

$$H_{Vmaks}=666C_{ek}+40 \tag{2.3}$$

H_{Vmaks} tidak selamanya teliti tetapi ada hubungannya dengan laju retakan.

Pengerasan seperti itu yang terjadi pada daerah pengelasan disebabkan karena naiknya temperatur transisi. Ito menemukan hubungan antara temperatur transisi pada pengujian Charpy, ${}_vT_S$, dengan komposisi kimia dari 45 muatan dari baja yang berkekuatan tinggi 80 kg/mm^2 yang dilas pada keadaan tertentu

$${}_vT_S=-70+290C+28Mn+46Cu-6Ni+25Cr+23Mo\ (°C) \tag{2.4}$$

Hasilnya adalah, unsur yang secara positip menurunkan ${}_vT_S$ pada daerah pengikat hanyalah Ni dan unsur lainnya menaikkan temperatur transisi, terutama C sangat berbahaya. Kedua persamaan (2.3) dan persamaan (2.4) telah didapat dari kondisi terten-

tu, keduanya bukan kondisi umum. Perlu dikatakan pula bahwa ada beberapa pengaruh dari ketakmurnian, inklusi dsb.

1.3.3 Penguatan baja untuk proses pengelasan

Baja lembaran tebal dibuat dalam berbagai macam bentuk dan dilas dijadikan konstruksi baja. Komposisi kimia baja tersebut adalah C≦0,23%, S≦0,04% dan P≦0,04%. Baja yang tidak mengandung unsur lain selain Si dan Mn disebut baja lunak (*mild steel*), yang banyak dipakai untuk bahan konstruksi baja karena mempunyai sifat mampu las dan mampu bentuk yang baik.

Tabel 2.2 menunjukkan contoh komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik. Kebanyakan baja rol dinormalkan, dengan komposisi kimia hanya mencapai kekuatan tarik 45 kg/mm^2. Baja kekuatan tinggi adalah baja paduan rendah dengan kekuatan lebih tinggi dari baja lunak, biasanya kekuatan tariknya kira-kira 50–100 kg/mm^2.

Tabel 2.2 Baja lunak.

Penamaan standar	Tanda JIS	Ketebalan t (mm)	Komposisi kimia (%)					Batas mulur (kgf/mm^2)	Kekuatan tarik (kgf/mm)^2	Perpanjangan batang uji (No. 1) (%)
			C	Si	Mn	P	S			
Baja rolan untuk ketel JIS G3103	SB35	$t \leq 19$ $19 \leq t \leq 50$	≤0,20 ≤0,22	≤0,30 〃	≤0,80 〃	≤0,035 〃	≤0,050 〃	≥19	35–42	≥26
Baja rolan untuk konstruksi lasan JIS G3106	SM41A	$16 \leq t \leq 40$ $50 \leq t \leq 100$	≤0,23 ≤0,25	—	≥2,50 〃	≤0,040 〃	≤0,050 〃	≥24	41–52	≥22

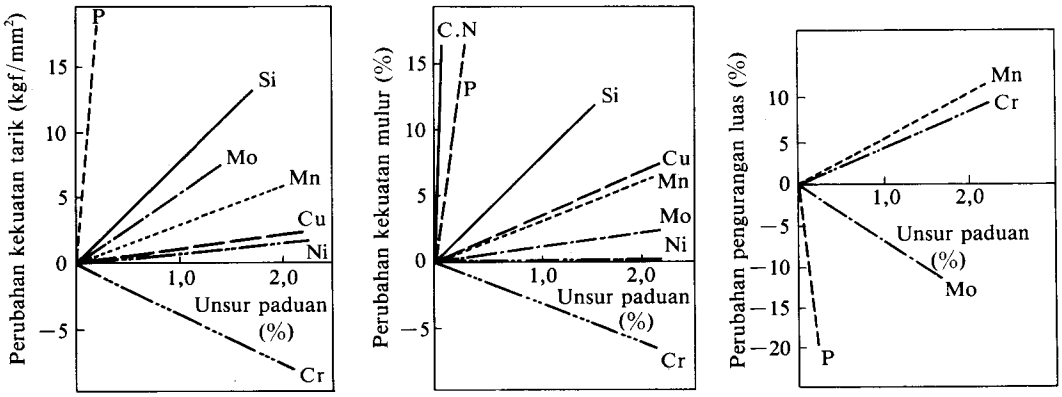
Baja kekuatan tinggi adalah bahan yang dapat dikurangi beratnya dengan sambungan las untuk merasionalkan konstruksi baja. Yaitu bahwa baja kekuatan tinggi memerlukan luas penampang yang kecil, dengan demikian mengurangi ketebalan pelat, dan bukan hanya meringankan seluruh konstruksi, tetapi juga menyederhanakan proses pengelasan, maka dengan demikian dapat mengadakan penghematan bahan dan lebih untung dari pada pemakaian baja lunak.

Baja kekuatan tinggi digolongkan pada baja berkekuatan tarik yang tinggi dengan atau tanpa perlakuan panas pada proses pembuatannya, dalam kedua hal ini penurunan mampu las diusahakan minimum.

(1) Baja kekuatan tinggi tanpa perlakuan panas

Baja kekuatan tarik tinggi tanpa perlakuan panas dipergunakan dalam keadaan setelah dirol atau setelah dinormalkan, struktur mikronya terutama ferit dan perlit.

Baja tersebut terutama diperkuat dengan jalan penambahan unsur-unsur paduan dan penghalusan butir melalui pengerolan. Sebagai baja paduan rendah, penambahan kekuatan adalah sebanding lurus dengan jumlah unsur paduan yang ditambahkan. Gb. 2.7 menunjukkan suatu contoh yang umum. Karena penambahan C sangat meningkatkan kekuatan tetapi menurunkan mampu las maka penambahan C tidak disarankan dalam usaha memperkuat baja tersebut. Bagi baja kekuatan tinggi tanpa perlakuan panas, Si dan Mn dipergunakan sebagai unsur paduan utama, mereka lebih baik, kurang membahayakan mampu las, lebih murah tetapi masih cukup untuk menambah kekuatan baja. Tabel 2.3 menunjukkan contoh komposisi baja tersebut. Persamaan dalam Gb. 2.7 menunjukkan pengaruh dari jumlah perlit dan diameter butir ferit. Jumlah perlit tergantung pada kadar C menurut persamaan tersebut penam-



Kekuatan tarik (kgf/mm²)=30,0+2,79 (%Mn)+8,41 (%Si)
+0,397 (%perlit)+0,791 ($d^{-1/2}$)
Kekuatan mulur (kgf/mm²)=10,3+3,31 (%Mn)+8,54 (%Si)+1,78 ($d^{-1/2}$)
Pengurangan luas (%)=78,5+5,39 (%Mn)−0,53 (%perlit)−0,33 (d)
d: diameter butir ferit (mm)

Gb. 2.7 Pengaruh unsur paduan pada sifat tarikan dari baja ferit-perlit.
(K. J. Irvine, F. B. Pickering: Pickering: JISI *201* (1963) 945)

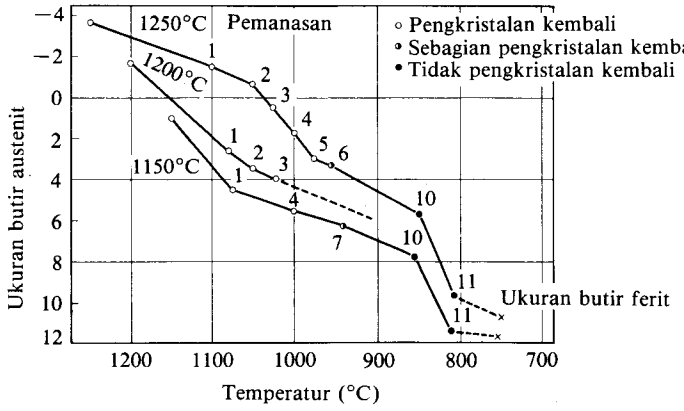
Tabel 2.3 Contoh komposisi kimia dan sifat-sifat mekanik baja kekuatan tinggi tidak mengalami perlakuan panas.

Tanda JIS	Ketebalan t (mm)	Komposisi kimia					Pengujian tarik				Pengujian Charpy	
		C	Si	Mn	P	S	Ketebalan t (mm)	Batas mulur (kgf/mm²)	Kekuatan tarik (kgf/mm²)	Perpanjangan (%)	Temperatur	kgf-m/cm²
SM50B	$t \leq 50$ $50 \leq t \leq 100$	≤0,20 ≤0,22	≤0,55	≤1,50	≤0,40	≤0,040	$16 \leq t \leq 40$ $40 \leq t$	≥32 ≥30	50-62 50-62	≥22 ≥24	0	≥2,8

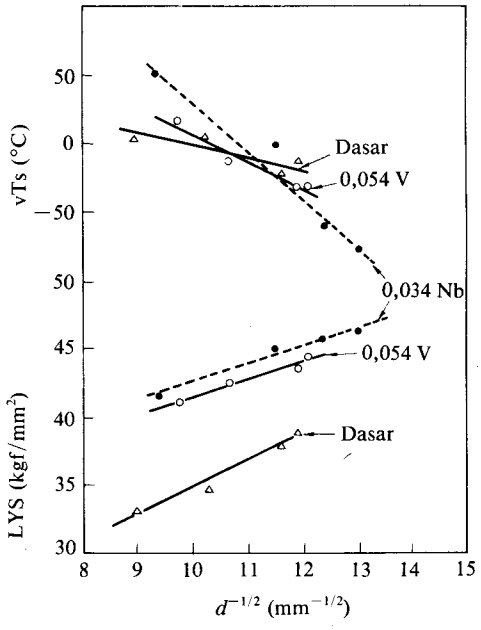
bahan perlit tidak mempengaruhi titik mulur tetapi mempengaruhi peningkatan kekuatan tarik. Diameter butir ferit sangat mempengaruhi titik mulur. Diameter butir ferit telah lama diketahui menjadi lebih kecil sampai ukuran tertentu apabila baja dimatikan oleh Al, tetapi sekarang dengan memperbaiki cara pengerolan didapat struktur halus setelah dirol. Cara pengerolan ini yang dimaksudkan untuk memperhalus butir dinamakan pengerolan terkendali, adalah salah satu teknik tak dapat dikesampingkan untuk baja terutama bagi konstruksi pipa.

Gb. 2.8 menunjukkan contoh cara tersebut. Pada bahan tersebut ditambahkan 1,4% Mn dan 0,2% C juga 0,04% Nb untuk memperlambat pengkristalan austenit. Gambar tersebut menyatakan temperatur pengerolan dan perubahan nomor besar butir dari austenit setelah setiap pas, demikian juga nomor besar butir ferit yang didapat pada transformasi setelah pas terakhir, dengan demikian pengaruh penghalusan butir dapat dijelaskan dengan baik. Gb. 2.9 menunjukkan hubungan antara temperatur transisi dan kekuatan mulur setelah proses penghalusan butir baja dengan pengerolan terkontrol. Ini menyatakan bahwa baja kekuatan tinggi yang tidak mengalami perlakuan panas bisa diperoleh sampai mencapai kekuatan 41-46 kgf/mm².

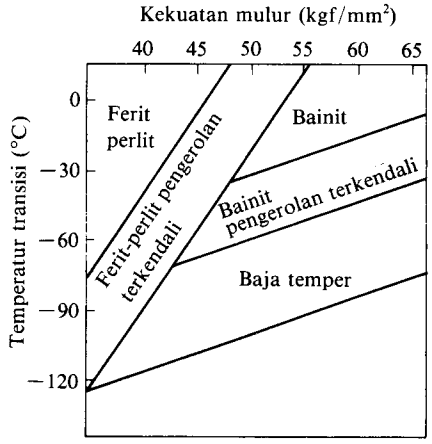
(2) Baja kekuatan tinggi yang mengalami perlakuan panas
Agar kekuatan baja meningkat dan keuletannya pada temperatur rendah juga



Gb. 2.8 Perubahan ukuran butir (γ) dalam proses pengerolan baja 1,4% Mn, 0,3% Si dan 0,04% Nb. Angka dalam grafik menunjukkan jumlah pas. (Kinoshita et al.: tetsu-to-Hagane *58* (1972), 1759).



Gb. 2.9 Hubungan antara temperatur transisi dan kekuatan mulur, diameter butir (d) dari baja 0,14% C-1,30% Mn-0,3% Si yang dirol terkendali. (H. Matsubara et al.: Tetsu-to-Hagane *58* (1972), 1848).



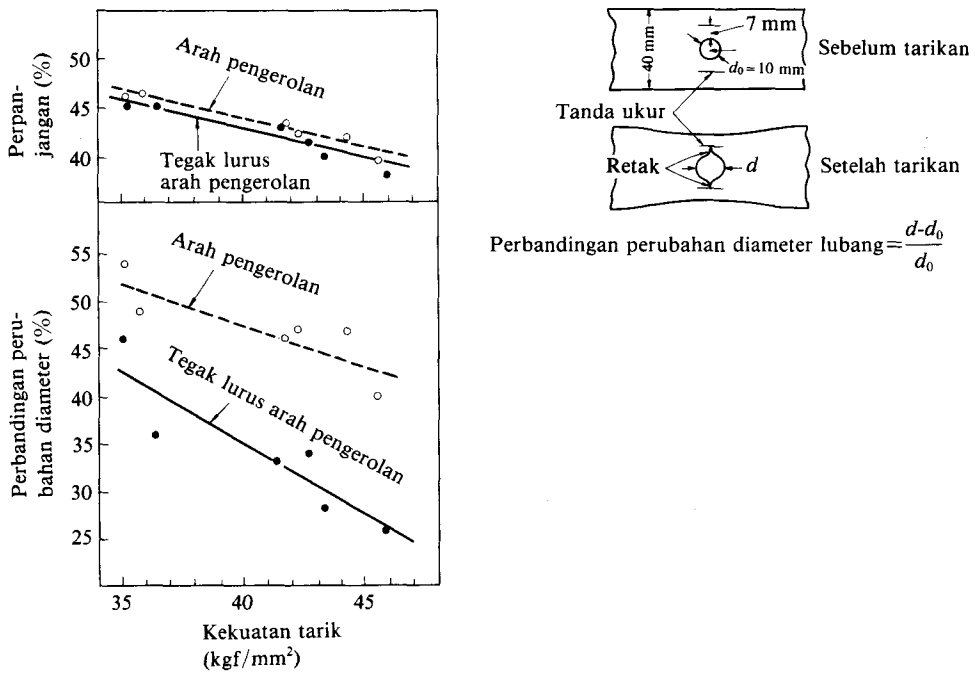
Gb. 2.10 Hubungan antara kekuatan dan keuletan baja karbon rendah untuk konstruksi baja.

meningkat, baja perlu dikeraskan dan ditemper. Sifat baja ini ditentukan oleh kadar C, P dan S dan unsur-unsur paduan tergantung pada pilihan pembuatnya. Sebagai tambahan pada Mn dan Si, Cr, Mo, V dst ditambahkan pada baja paduan rendah. Tergantung pada tingkat kekuatan tariknya, baja tersebut dinamakan baja kekuatan tinggi 60–80 kgf/mm^2. Juga baja dengan kekuatan 110 kgf/mm^2 telah dibuat. Gb. 2.10 menunjukkan hubungan antara kekuatan mulur dan temperatur transisi dari baja kekuatan tinggi. Baja kekuatan tinggi yang telah mengalami perlakuan

panas apabila dibandingkan pada tingkat kekuatan mulur yang sama, mempunyai temperatur transisi yang rendah dan mempunyai keuletan yang baik pada temperatur rendah.

1.3.4 Mampu bentuk baja yang dirol panas

Baja tebal yang dirol panas, mempunyai derajat pengerjaan yang tinggi pada pembengkokannya, dalam hal ini penilaian terhadap keliatannya sekedar hanya pada perpanjangannya dalam pengujian tarik, tidaklah memadai. Maka di setiap negara dipakai standar yaitu melihat terjadinya keratakan pada pengujian bengkok 180°. Dalam pengujian tarik, perbandingan perubahan diameter lubang pada batang uji tarik dengan lubang, dan perpanjangan dari tarikan pada batang tarik, dsb, menunjukkan mampu bentuknya. Gb. 2.11 menunjukkan suatu contoh hasil pengujian untuk baja pelat yang dirol panas dengan ketebalan 3,2 mm. Definisi mengenai perbandingan perubahan diameter lubang ditunjukkan juga dalam gambar tersebut. Perbedaan perpanjangan yang biasa pada arah batang uji, tidak begitu jelas, tatapi perbandingan perubahan diameter lubang sangat berubah terhadap arah pengerolan dan tegak lurus terhadap arah batang tarik, yang menunjukkan mampu bentuk yang sangat sensitip. Mampu bentuk sangat menurun oleh adanya kadar O, S dan meningkatnya jumlah perlit. Selanjutnya mampu bentuk menjadi lebih baik apabila temperatur akhir pada pengerolan terkontrol (terkendali) dan strukturnya adalah butir-butir halus.



Gb. 2.11 Hubungan antara perpanjangan dan perbandingan perubahan diameter lubang dan kekuatan tarik baja lunak dengan ketebalan 3,2 mm. (J. Kubodera: Formability of thin plate, the Ninth Nishiyama Memorial Course (1969) 5, Iron & Steel Inst. Japan)

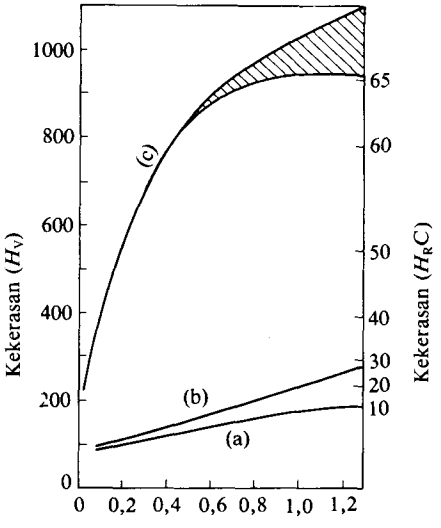
1.4 Penggunaan baja untuk kekuatan dan keuletan

Sebagai petunjuk pertama dalam pemilihan baja yang akan dipakai sebagai bahan konstruksi ialah kekuatan dan keuletan yang memadai. Satu dari sekian sifat-sifat baja yang paling penting ialah kekuatan, tetapi karena pada umumnya apabila kekuatan ditingkatkan, keuletannya menurun, maka kekuatan yang berlebihan menyebabkan kerusakan karena benturan, dsb. Pada umumnya baja yang telah dikeraskan dan ditemper dipakai untuk keperluan tersebut.

1.4.1 Kekerasan baja setelah dicelup dingin dan mampu keras

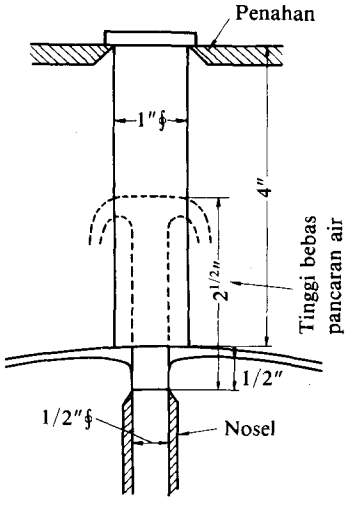
Kekerasan baja setelah dicelup dingin terutama tergantung pada kadar karbonnya. Gb. 2.12 menunjukkan hubungan antara kekerasan baja yang dinormalkan dengan kadar karbon. Kekerasan baja setelah dicelup dingin meningkat hampir berbanding lurus dengan kadar karbon sampai 0,6% selanjutnya peningkatan gradien lebih kecil kalau kadar karbon meningkat. Telah diketahui bahwa struktur martensit yang dinormalkan lebih keras daripada struktur ferit-perlit atau perlit.

Untuk memberikan kekuatan dan keuletan pada baja, pertama baja harus dikeraskan dengan mencelup dingin. Lebih baik mempunyai 100% martensit setelah dicelup dingin, tetapi untuk mendapat 100% martensit harus didinginkan pada pendinginan tertentu yang lebih besar dari pendinginan kritis dari fasa austenit. Tetapi umumnya bagi yang berukuran besar susah untuk mendapat laju pendinginan yang lebih besar dari laju pendinginan kritis di tengah-tengahnya. Mampu keras adalah sifat yang menunjukkan bahwa baja dikeraskan pada keadaan tertentu, berapa dalam dari permukaan yang didinginkan strukturnya menjadi martensit.



(a) Sementit bulat
(b) Perlit
(c) Martensit

Gb. 2.12 Hubungan antara kekerasan baja setelah dicelup dingin dan dinormalkan dengan kadar karbon.

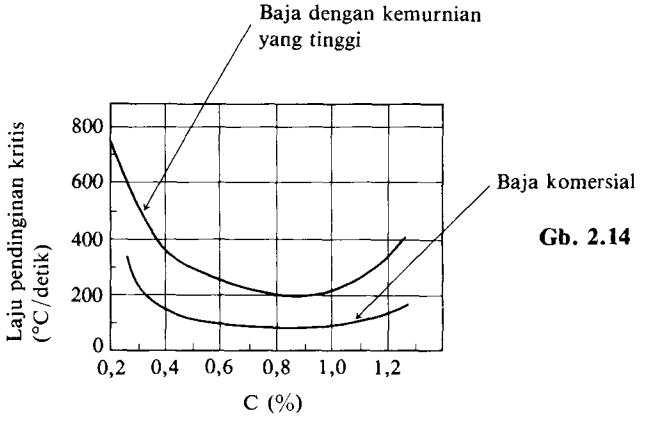


Gb. 2.13 Batang uji pada pengujian Jominy. Garis titik-titik menyatakan tinggi bebas pancaran air sebelum dipasang batang uji.

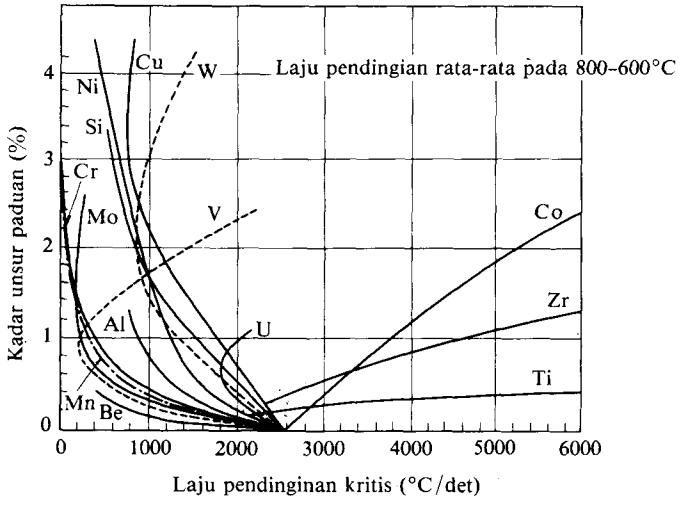
Mampu keras baja dapat diperoleh dari diagram temperatur transformasi dan waktu (diagram/TTT) dan diagram pendinginan kontinu (diagram CCT) dari pendinginan kritisnya, atau dengan pengujian Jominy seperti ditunjukkan dalam Gb. 2.13 yang dinamakn pengujian celup dingin ujung, untuk mendapat panjang daerah celup dingin. Makin besar laju pendinginan kritis makin panjang daerah celup dingin pada pengujian Jominy, makin baik mampu kerasnya.

Gb. 2.14 menunjukkan pengaruh kadar karbon pada laju pendinginan kritis. Kalau kadar karbon meningkat, mampu keras menjadi lebih baik dan mencapai tertinggi pada 0,8–0,9% C. Baja komersial mempunyai mampu keras yang lebih baik karena mengandung Si, Mn dan unsur-unsur lain.

Gb. 2.15 menunjukkan hubungan antara kadar unsur-unsur paduan dan laju pendinginan kritis kalau berbagai unsur ditambahkan pada baja 0,3% C. Unsur-unsur lain selain Co menurunkan laju pendinginan kritis dan memperbaiki mampu keras dengan penambahan sekurang-kurangnya sampai sejumlah tertentu. Unusur-unsur seperti Mn, Cr, Mo, Ni, Si, dsb. memperbaiki mampu keras yang lebih baik dengan kadar yang lebih, sedangkan unsur-unsur lain seperti Ti, V, Zr, W, U, dsb, dengan pe-



Gb. 2.14 Hubungan antara jumlah karbon dan laju pendinginan kritis untuk baja karbon. (K. Momma, H. Sudo: Iron and steel materials and their heat treatment, Japan Society of Metals (1969))



Gb. 2.15 Pengaruh berbagai unsur paduan yang ditambahkan pada baja 0,3%C, terhadp laju pendinginan kritis. (Properties of steel materials and their tests, edited by Iron & Steel Inst. Japan, Chijin Shoken (1977), 119).

nambahan yang berlebihan menurunkan mampu keras. Sedikit Be sangat memperbaiki mampu keras, tetapi tidak pernah dipakai karena mahal dan bersifat racun. Seperti telah dikemukakan di atas banyak unsur-unsur memperbaiki mampu keras baja, tetapi pengaruh dari pengintian dan penurunan laju pertumbuhan pada ferit proeutektoid, dsb, masih dalam penelitian, belum dapat dijelaskan bagi setiap unsur.

Penambahan B sebanyak 0,0005-0,005% sangat memperbaiki mampu keras. tetapi masih belum mencapai laju pendinginan kritis. Dengan penambahan B yang berlebihan menyebabkan presipitasi suatu senyawa pada batas butir yang mengakibatkan kegetasan, jadi biasanya dipergunakan kadar 0,001-0,0015%, yang memberikan pengaruh baik pada perbaikan mampu keras. Selanjutnya dengan kadar karbon yang lebih pengaruh yang lebih baik dapat diperoleh dan pada kira-kira 0,8% C hampir tidak ada pengaruh yang bisa dilihat.

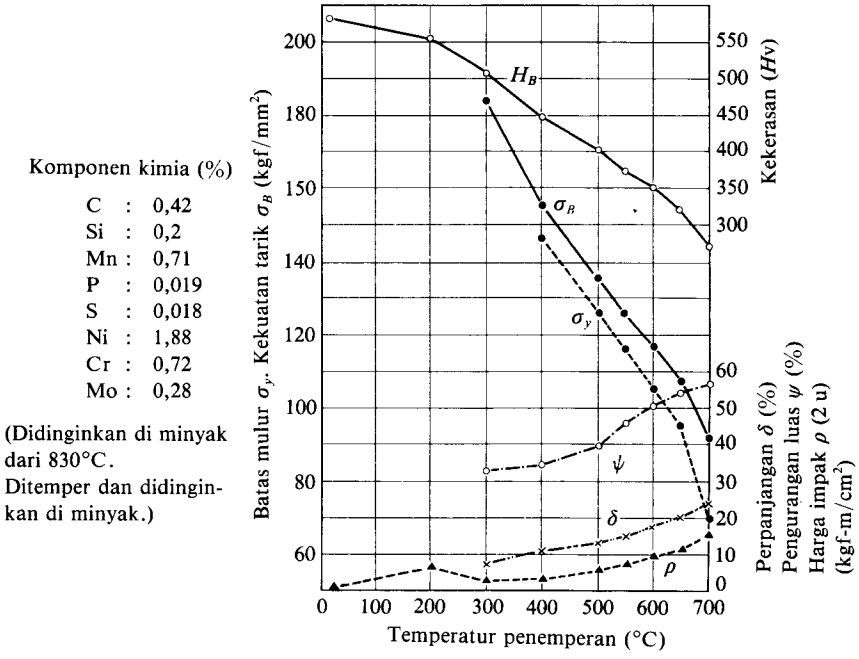
Di samping itu sebagai suatu faktor pada mampu keras adalah ukuran butir austenit. Makin besar ukuran butir austenit makin baik pengaruhnya terhadap mampu keras, karena transformasi proeuektoid dan perlit terjadi pada batas butir austenit, sehingga makin banyak batas butir makin banyak tempat pengintian, jadi transformasi demikian mudah terjadi.

Kalau luas batas butir mengecil maka transformasi berkurang, hal ini menyebabkan mudah terjadinya transformasi martensit.

1.4.2 Baja paduan untuk konstruksi mekanik

Sebagai unsur paduan untuk baja paduan yang dipergunakan bagi konstruksi mekanik adalah Ni-Cr, Ni-Cr-Mo, Cr, Cr-Mo, Mn, dan Mn-Cr.

Baja paduan mempunyai kelebihan sebagai berikut:



Gb. 2.16 Pengaruh temperatur penemperan pada sifat-sifat mekanik dari baja martensit yang ditemper. (Japan Industrial Standard Association; Manual for JIS machine structural carbon steel and structural alloy steel (1962), 33).

1) Mempunyai mampu keras yang baik meskipun berukuran besar dapat dikeraskan sampai ke dalam, jadi dengan penemperan dapat diperoleh struktur yang lebih uniform. Di samping itu kekuatan yang lebih tinggi dan keuletan yang lebih baik dapat diperoleh.
2) Karena mempunyai mampu keras yang lebih baik tidak perlu pendinginan yang cepat pada pengerasannya, hal ini menyebabkan rendahnya tegangan sisa.

Gb. 2.16 menunjukkan contoh perubahan pada sifat mekanik untuk baja yang ditemper dan dikeraskam. Kekerasan, kekuatan tarik dan kekuatan mulur menurun kalau temperatur tempering meningkat dan harga impak meningkat kecuali di antara daerah 200–300°C.

Komponen mekanik yang umumnya dibuat adalah: poros roda gigi, baud, mur, batang torak, dsb. Berkat pengembangan dalam teknik pembuatan, bukan hanya pemesinan tetapi juga pengerolan dingin, ektrusi dingin dan penempaan dingin lainnya banyak dipergunakan. Dalam perlakuan panas juga dipakai pemanasan frekwensi tinggi hanya pada permukaan yang dikeraskan. Ini semua disebabkan oleh permintaan penurunan biaya produksi penghematan energi dan pengurangan polusi lingkungan.

Baja Ni–Cr–Mo sangat baik kekuatan dan keuletannya, tetapi Ni mahal; hal ini merupakan suatu pembatas, usaha dilakukan dalam teknik produksi ini untuk mencoba menggantikannya dengan baja Cr–Mo atau baja Cr. Untuk maksud yang sama B dipakai karena pengaruhnya dapat memperbaiki mampu keras dengan penambahan yang sedikit saja.

1.4.3 Pengerasan kulit

Beberapa komponen mesin mempunyai permasalahan bukan hanya dalam soal keuletan tetapi juga dalam kelelehan yang disebabkan keausan permukaan tegangan yang bolak balik seperti pada roda gigi. Untuk mengatasi kesukaran tersebut perlu memberikan kekerasan yang lebih tinggi pada permukaan. Dengan jalan pengerasan kulit hal tersebut dapat diatasi, yaitu dengan pengarbonan, penitridan, pengerasan permukaan dengan arus frekwensi tinggi atau dengan nyala api dan sebagainya.

(1) Pengarbonan

Reaksi pengarbonan dapat dijelaskan sebagai berikut:

$$CO_2 + C(\text{arang}) \rightarrow 2CO$$

$$2CO + CO_2 + C(\text{larut ke dalam baja})$$

Pada pengarbonan padat dalam kotak, dipakai arang yang dicampur 10% $NaCO_3$ dan $BaCO_3$, ke dalam campuran tersebut dimasukkan baja yang akan dikeraskan, kotak kemudian ditutup rapat dan dipanaskan pada 900–950°C. Dengan demikian permukaan baja akan mempunyai kadar karbon lebih tinggi. Karena struktur baja menjadi kasar disebabkan pemanasan yang lama, setelah pengerasan pertama pada 800–950°C perlu dihaluskan dengan jalan pengerasan kedua pada 800°C- dan ditemper pada 150–200°C sebelum dipergunakan.

Sebagai bahan pengarbon, di samping arang, dipakai juga pengarbon cair yaitu garam cair mengandung NaCN sebagai komponen utama, dan dipakai juga pengarbon gas dengan gas-gas yang mengandung karbon yang berasal dari butan, propan dan lainnya. Dicampur dengan udara dan dipakai Ni sebagai katalis. Pada pengarbonan dengan gas dapat mengontrol kadar karbon pada permukaan benda kerja dan juga benda kerja dapat dicelup dingin langsung setelah pengarbonan.

(2) Penitridan

Proses ini dimaksudkan untuk membuat kulit nitrida pada permukaan baja dengan jalan menempatkan baja di dalam tungku yang dialiri gas amoniak dan dipanaskan pada kira-kira 500°C. Karena baja telah dikeraskan dan ditemper pada temperatur proses lebih rendah daripada temperatur penemperan, maka struktur di dalam tidak berubah. Baja untuk keperluan ini mengandung Al, Cr, Te, V, Mn dan Si yang mempunyai afinitas kuat dengan N.

Baru-baru ini penitridan ion telah menjadi perhatian. Tungku yang telah divakumkan diisi dengan gas N_2 atau N_2+H_2 pada tekanan 1–10 Torr, tungku dibuat sebagai anoda dan baja dibuat sebagai katoda, dihubungkan dengan tegangan beberapa ratus vol, kalau gas telah diionisasikan oleh aliran elektron dan permukaan baja terpanaskan maka terjadilah penitridan secara simultan.

Penitridan adalah suatu proses yang sangat baik di mana sukar terjadi transormasi atau perubahan struktur dari logam induk, yang menghasilkan kulit nitrida yang keras yang sangat tahan aus.

(3) Pengerasan frekwensi tinggi dan pengerasan nyala api

Baja ditempatkan dalam lilitan, dan lilitan dialiri arus frekwensi tinggi dengan demikian permukaan baja terpanaskan. Setelah permukaan baja sampai pada temperatur celup dingin, kemudian baja dicelup dingin untuk mendapat permukaam yang keras. Proses ini dinamakan pengerasan frekwensi tinggi.

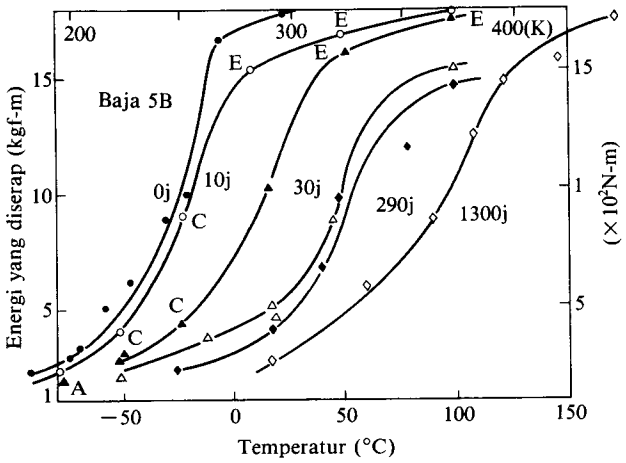
Pengerasan dengan nyala api mempergunakan nyala api yang ditimbulkan oleh gas oksigen-asetilen untuk memanaskan permukaan baja.

1.4.4 Kegetasan temper

Selama penemperan baja yang telah dikeraskan, terjadi pelunakan dan peningkatan keuletan. Pada penemperan di sekitar 200–300°C kekuatan impak turun dan dengan pendinginan yang perlahan-lahan setelah penemperan sekitar 500°C atau pemanasan yang lama sekitar 500°, maka kekuatan impak sangat turun. Fenomena pertama disebut kegetasan temper pada temperatur rendah dan yang kedua dinamakan kegetasan temper pada temperatur tinggi. Kegetasan temper pada temperatur tinggi mempunyai banyak masalah karena menyangkut temperatur penemperan baja di mana baja memerlukan keuletan tinggi, sedangkan banyak baja dipergunakan pada temperatur sekitar 500°C. Selanjutnya penggunaan baja pada temperatur sekitar itu pada waktu yang lama akan terjadi fenomena yang sama.

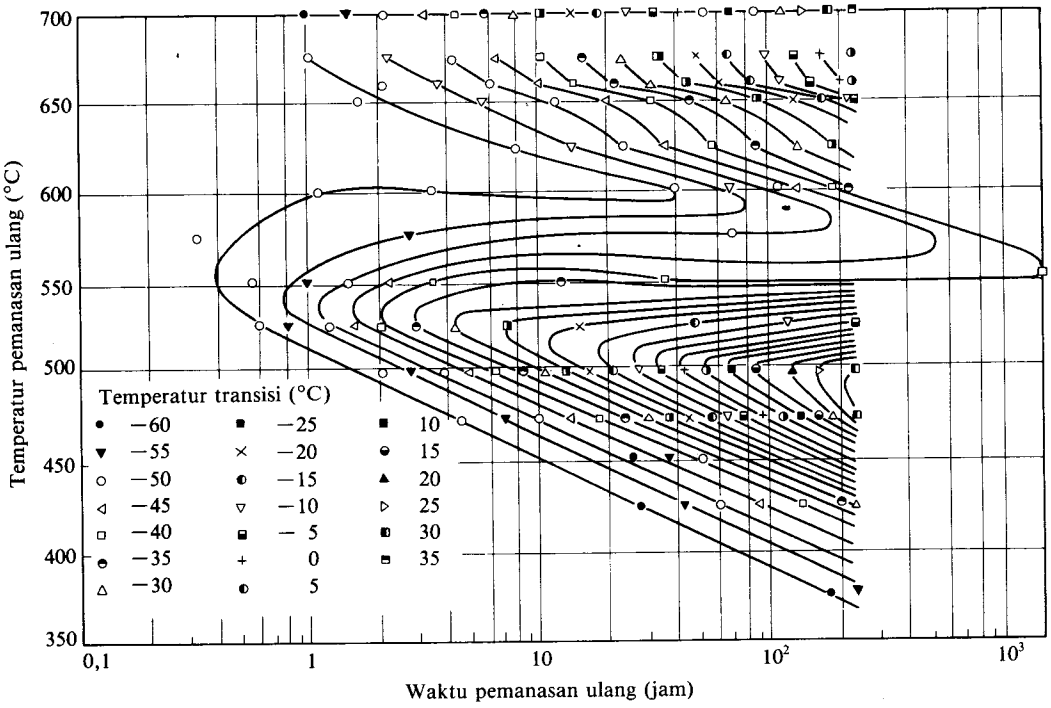
Gb. 2.17 menunjukkan kurva perubahan antara energi yang diabsorb dan temperatur baja yang mengandung 2,25% Cr–1% Mo–0,3% C yang dipanaskan pada 500°C. Kegetasan terjadi dalam bentuk kurva impak transisi bergerak ke daerah temperatur tinggi. Seperti telah diketahui dari hubungan antara temperatur dan waktu pemanasan untuk meningkatkan temperatur transisi, suatu kurva berbentuk C dapat dibuat dengan hidungnya pada kira-kira 500°C seperti ditunjukkan pada Gb. 2.18. Kegetasan temper sangat terlihat pada martensit yang ditemper. Baru-baru ini sebab-sebabnya telah dapat dijelaskan oleh mikroskopi elektron Auger bahwa kadar ketakmurnian seperti P, Sn, As, dsb, disegregasikan ke batas butir.

Dalam usaha mengendalikan kegetasan temper telah lama diketahui bahwa Mo cukup efektip untuk mengatasinya, dan untuk material baja dalam jumlah banyak yang memerlukan banyak waktu lama untuk melalui temperatur sekitar 500°C setelah penemperan, maka dipergunakan baja yang mengandung Mo kira-kira 0,2–1%, akan tetapi angka tersebut belum dinyatakan secara jelas. Terutama untuk mereduksi



0j: Spesimen ditemper dan didinginkan cepat
10j–1300j: Waktu pemanasan dalam jam

Gb. 2.17 Kurva perubahan energi yang diserap terhadap temperatur dari baja yang dipanaskan pada 500°C dengan kadar 2,25% Cr-1% Mo-0,3%C. (T. Nakamura et al: Trans ISIJ *19* (1979), 428)



Gb. 2.18 Kurva penggetasan isotermal dari baja AISI 3140 (0,4% C—1,25% Ni—0,8% Cr) dicelup dingin dari 900°C dan ditemper pada 675°C celama 1 jam. (J. D. Jaffe, D. C. Buffum, J. Metals *9* (1957) 8)

ketakmurnian P yang biasanya terkandung dalam baja, cara tersebut sangat efektip, jadi teknik pemurnian untuk mengendalikan P telah dikembangkan sampai beberapa puluh ppm. Sedangkan terjadinya kehadiran P belum dapat dijelaskan, tetapi telah diketahui bahwa P merupakan membran tipis kira-kira satu lapisan atom dan tersegregasikan pada batas butir.

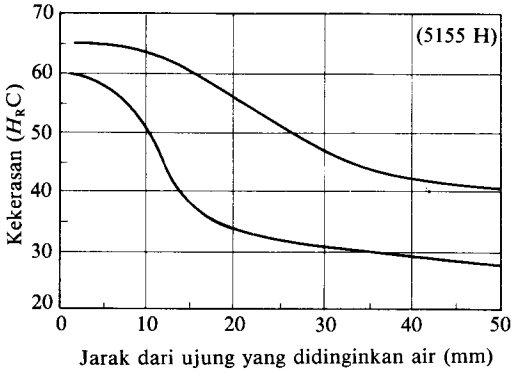
1.5 Baja yang mempunyai kekerasan tinggi sebagai sifat utamanya

1.5.1 Baja pegas

Baja pegas sebenarmya tidak mempunyai kekerasan yang tinggi sebagai sifat utamanya, tetapi untuk mudahnya baja ini dimasukkan pada pembahasan dalam fasal ini. Sifat utama dari baja pegas adalah modolus elastik dan batas elastik, tetapi bagi baja paduan rendah modolus elastik boleh dikatakan tetap, oleh karena itu persoalan di dalam industri ialah bagaimana mempergunakan batas elastis agar mendapat kekuatan yang dibolehkan lebih tinggi.

Baja pegas adalah baja karbon yang mengandung 0,5–1,0% karbon atau baja karbon rendah yang dicampur dengan Si, Mn dan Cr sampai 1%, selanjutnya dengan Mo, V sampai 0,25% dan dengan B yang jarang dilakukan sampai 0,0005%.

Baja pegas perlu memiliki batas elastik yang tinggi setelah dikeraskan dan ditemper. Untuk keperluan ini standar di setiap negara mempunyai pita H yang menyatakan batas tertinggi dan terendah dari hasil uji mampu keras menurut Jominy. Gb. 2.19 menunjukkan contoh tersebut. Dari gambar tersebut mampu keras menjadi



Gb. 2.19 Pita H dari baja pegas Mn-Cr (0,6% C-0,8% Mn-0,8% Cr). (SAE Handbook (1960))

Tabel 2.4 Contoh perlakuan panas dan sifat-sifat mekanis baja pegas.

Komposisi kimia (wt %)	Perlakuan panas		Sifat-sifat mekanik				
	Pencelupan dingin (°C pada minyak)	Penemperan (°C)	Batas mulur (kgf/mm²)	Kekuatan tarik (kgf/mm²)	Perpanjangan (%)	Pengurangan luas (%)	Kekerasan (H_B)
0,8C	830–860	450–500	>85	>110	>8	—	341–401
0,6C–1,7Si–0,8Mn	〃	480–530	>110	>125	>9	>20	363–429
0,6C–0,8Mn–0,8Cr	〃	460–510	〃	〃	〃	〃	〃
0,6C–0,8Cr–B							

lebih tinggi secara berturut-turut mulai dari baja karbon, baja Si-Mn, baja Mn-Cr, baja Mn-Cr-B, di mana sebagian besar pegas dibuat dari baja tersebut. Selanjutnya pada standar tersebut disertakan juga kurva penemperan yang selanjutnya dapat di man-faatkan.

Tabel 2.4 menunjukkan contoh perlakuan panas dan sifat-sifat mekanis dari baja pegas.

1.5.2 Baja bantalan

Baja 1% C-1% Cr dipergunakan sebagai bahan untuk bantalan peluru dan bantalan rol di setiap negara, tanpa mengubah komposisi kimianya, karena baja tersebut mempunyai mampu keras yang baik, mampu mesin yang baik dan umur yang lama.

Untuk bantalan yang besar dipakai bahan yang mengandung lebih dari 1% Mn atau Cr atau Mo, tetapi komposisi utamanya tetap tidak berubah.

Untuk bantalan, peluru, rol dan ring dibuat dari bahan yang sama, mungkin juga dengan struktur berbutir halus dari sementit bulat yang didapat dengan pengerasan dicelup dingin di air atau minyak dari temperatur 800-840°C setelah pembentukan. Pada umumnya pemanasan baja karbon-tinggi diatmosfir harus dikendalikan untuk menghindari terjadinya dekarburisasi, biasanya dengan mempergunakan campuran gas H_2, CO dan N_2 atau lingkungan Ar. Temperatur penemperan paling tinggi 200°C agar mencapai kekerasan H_R C 64-66.

Umur baja bantalan tergantung keausan *fretting*, jadi inklusi sangat menentukan. Inklusi yang besar dapat dilihat oleh pengamatan visual. Untuk bantalan yang baik dan efisien, pemurnian baja dilakukan di bawah vakum (VAR=Vacuum arc remelting) atau dengan pencairan elektroslag (ESR=electroslag remelting) untuk menghindari pencampuran dengan inklusi.

1.5.3 Baja perkakas dingin

Umumnya baja perkakas mempunyai kadar karbon yang tinggi, macamnya adalah sangat banyak mulai dari baja perkakas karbon yaitu untuk perkakas pemotong kayu, pemotong daging, pisau cukur, kikir, baja perkakas paduan rendah dengan unsur paduan Cr, W, V, untuk perkakas pemotong, cetakan penarikan kawat, tap dan dril sampai baja perkakas paduan medium dengan unsur paduan Cr, W, Mo V, untuk cetakan penarikan kawat, alat pengetrim, pengukur (*gauges*), pengerol derat dsb. Contoh yang biasa ditunjukkan pada Tabel 2.5. Komposisi kimia menunjukkan

Tabel 2.5 Contoh komposisi kimia dan penggunaan baja perkakas dingin.

Baja perkakas		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	W	V	Penggunaan
Baja karbon	1	1,10	<0,35	<0,50	<0,030	<0,030	<0,20				Tap, cetakan, pisau cukur, pahat kayu.
〃	2	0,65	〃	〃	〃	〃	〃				Penggores, cetakan pres, pisau, dsb.
Baja paduan rendah	1	1,35	〃	〃	〃	〃	0,75		4,5		Perkakas potong, cetakan penarikan dingin.
〃	2	1,25	〃	〃	〃	〃	0,35		3,5	0,2	-sama dengan di atas-
〃	3	1,05	〃	〃	〃	〃	0,75		1,25		Tap, gurdi, pemotong, gergaji, cetakan penarikan.
〃	4	0,5	〃	〃	〃	〃	〃		0,75		Pahat kayu, pons, pemegang.
〃	5	0,8	〃	〃	〃	〃	0,40		2,0	0,25	Pahat kayu, pons, mata pisau, pemotong kikir.
〃	6	1,0	<0,25	<0,30	〃	〃				0,18	Gurdi batu, torak.
Baja paduan	1	1,0	<0,40	0,75	〃	〃	5,0	1,0		0,35	Pengukur, cetakan penarikan, rol derat.
〃	2	1,0		2,0			1,0	1,0			Cetakan pengetrim, cetakan penarikan.
〃	3	0,5					5,0	1,4	1,5Ni	1,0	Mata gunting untuk pelat tebal.
Baja paduan tinggi	1	2,1	<0,40	<0,60	〃	〃	13,0				Cetakan penarikan kawat, cetakan pengetrim.
〃	2	1,5	〃	<0,50	〃	〃	12,0	1,0		0,35	Pengukur, cetakan pengetrim, rol derat.
〃	3	2,0	〃	<0,60	〃	〃	13,0		3,0		Cetakan penarikan kawat, cetakan pengetrim

Tabel 2.6 Penempaan dan kondisi perlakuan panas baja perkakas dingin sesuai dengan tabel 2.5.

Baja		Temperatur penempaan (°C)	Titik transformasi (°C)		Penganilan (°C)		Pencelupan dingin (°C)		Penemperan (°C)		Kekerasan	
			Ac	Ar							Penganilan (H_B)	Temperatur celup dingin (H_RC)
Baja perkakas karbon	1	1050–850	730–750	720–690	750–780	SC	760–820	WC	150–200	AC	187–212	>63
〃	2	1100–850	730–770	720–680	750–780	〃	760–820	〃	150–820	〃	179–201	>54
Baja perkakas paduan rendah	1	1050–900	760–780	710–700	750–800	〃	830–880	OC	150–200	〃	192–217	>63
〃	2	1050–850	760–780	710–700	750–800	〃	830–880	〃	150–200	〃	192–217	>61
〃	3	1050–850	760–780	710–700	750–800	〃	830–880 780–820	〃 WC	150–200	〃	192–217	>61
〃	4	1050–850	760–810	735–665	750–800	〃	830–880	OC	150–200	〃	187–201	>56
〃	5	1050–850	750–680	700–680	750–800	〃	830–880	〃	150–200	〃	192–212	>55
〃	6	1100–850	730–770	715–685	750–800	〃	770–820	WC	150–200	〃	187–200	>63
Baja perkakas paduan medium	1	1100–900	790–815	770–740	850–900	〃	950–1000	AC	150–200	〃	212–255	>61
〃	2	1100–900	790–815	770–740	850–900	〃	850–880	〃	150–200	〃	212–255	>61
〃	3	1050–850	760–810	735–665	750–800	〃	830–880	〃	150–200	〃	185–200	>56
Baja perkakas paduan tinggi.	1	1050–900	780–810	685–640	850–900	〃	930–980	OC	150–200	〃	223–269	>61
〃	2	1100–900	820–860	770–690	850–900	〃	1000–1050	AC	150–200	〃	212–255	>61
〃	3	1050–900	795–820	745–725	850–900	〃	930–980	〃	150–200	〃	255–321	>61

Catatan: Ac: Titik transformasi pada pemanasan, Ar: Titik transformasi pada pendinginan, SC: Pendinginan lambat, WC: Pendinginan air, OC: Pendinginan minyak, AC: Pendinginan udara.

harga rata-rata. Tabel 2.6 menunjukkan contoh perlakuan panas.

(1) Penempaan baja perkakas

Baja perkakas pertama dibuat dengan jalan penempaan, karena dengan itu diharapkan dapat dibuat berbagai macam bentuk. Tabel 2.6 menunjukkan temperatur yang diperlukan untuk penempaan. Temperatur penempaan berbeda bagi setiap macam baja tetapi umumnya di sekitar 900–1050°C yang pada dasarnya lebih rendah daripada temperatur penempaan untuk baja konstruksi. Sebaiknya pemanasan baja tersebut harus perlahan-lahan, pertama dipanaskan merata sampai suatu temperatur di bawah temperatur transformasi Ac kemudian dipanaskan lebih lanjut. Pemanasan berlebihan harus dihindari.

Pendinginan setelah penempaan tidak begitu diperlukan bagi baja yang dikeraskan dengan celup dingin di air, tetapi bagi baja yang dapat mengeras sendiri harus didinginkan perlahan-lahan dalam abu atau lainnya.

(2) Penormalan

Proses ini untuk memperbaiki keseragaman keadaan setelah penempaan, untuk membuat larutnya karbida dan untuk memudahkan speroidisasi atau pembulatan karbida. Temperatur penormalan kira-kira 100°C di atas A_c, dan waktu pemanasannya singkat. Baja paduan rendah didinginkan pada atau dengan tiupan udara.

(3) Pelunakan

Hal yang terpenting dalam pelunakan adalah speroidisasi dari karbida. Sebaiknya dibuat siklus pemanasan seperti halnya untuk baja bantalan. Bagi komponen yang jarang diganti diperlukan tungku yang lingkungannya terkontrol untuk menghindari dekarburisasi, apabila tungku demikian tidak ada, proses pendinginan dalam tungku bisa dilakukan dalam sebuah kotak yang diisi geram besi cor. Proses ini dilakukan dalam beberapa jam tergantung pada ukuran dari komponen dan didinginkan sampai 500°C secara perlahan-lahan. Perlu diperhatikan bahwa baja yang mengandung W setelah pemanasan lama, mungkin karbid yang ada berubah menjadi WC, karena WC sangat sukar larut dalam austenit selama pemanasan pada pengerasan, dengan demikian pemanasannya hampir sama dengan pemanasan untuk baja karbon rendah, hal ini menyebabkan menurunnya mampu keras. Kalau hal ini terjadi tidak ada jalan lain kecuali memanaskannya lagi sampai temperatur cukup tinggi sehingga WC menjadi larut dan baja dapat ditempa.

(4) Pencelupan dingin

Baja karbon tinggi perlu mendapat perhatian terhadap dekarburisasi, karena lapisan dekarbusisasi menyebabkan keretakan pada waktu celup dingin. Tungku yang lingkungannya dapat dikontrol diperlukan untuk maksud ini tetapi untuk komponen yang kecil biasa dipakai tungku garam cair atau lainnya. Pemanasan merata juga diperlukan.

Waktu pencelupan dingin juga harus sesuai. Waktu pencelupan yang terlalu lama menyebabkan segregasi karbida, pengkasaran butir austenit atau pada saat pencelupan dingin meningkatnya austenit sisa yang menyebabkan turunnya kekerasan. Pendinginan harus dilakukan secara sempurna. Pendinginan harus serata mungkin, pada permulaaannya didinginkan cepat di bawah temperatur transformasi martensit kemudian pendinginan perlahan-lahan. Perlu diusahakan agar austenit sisa ada dalam jumlah sekecil mungkin, oleh karena itu perlu diadakan "perlakuan di bawah nol", Proses ini adalah transformasi martensit pada temperatur rendah, jadi

pendinginan yang perlahan-lahan diperlukan karena dapat terjadi keretakan disebabkan pemuaian. Proses tersebut biasanya dilakukan di dalam alkohol, kemudian temperaturnya diturunkan perlahan-lahan dengan memasukkan CO_2 padat ke dalamnya.

1.5.4 Baja perkakas panas

Baja perkakas panas adalah bahan yang dipakai untuk proses pengerjaan panas seperti pada pengecoran cetak, ekstrusi, untuk bilah penggunting, dan untuk cetakan penempaan panas yang dipakai pada temperatur tinggi, dsb.

Sifat-sifatnya yang diperlukan adalah:

1) Mudah dimesin dan dibentuk menjadi cetakan
2) Mempunyai mampu keras yang baik dan transformasi yang kurang pada waktu perlakuan panas.
3) Tidak mempunyai sifat mengarah dan bersifat homogen.
4) Mempunyai ketahanan tinggi terhadap pelunakan temper.
5) Mempunyai kekerasan panas tinggi dan keuletan yang baik.
6) Mempunyai ketahanan aus yang tinggi dan mempunyai deposisi termal dan fusi yang kurang.
7) Kuat terhadap kerugian karena fusi, kejutan termal, kelelahan termal, dst.

Tabel 2.7 menunjukkan komposisi kimia, perlakuan panas dan kekerasan dari baja perkakas panas. Baja tersebut secara kasar dapat digolongkan menjadi baja yang diperkuat oleh Cr, Mo dan W baja yang diperkuat dengan presipitasi.

Tanel 2.7 Contoh komposisi kimia dan perlakuan panas baja perkakas panas.C

Baja	Komposisi kimia (%)							
	C	Si	Mn	Cr	Mo	W	V	Ni
Baja Cr	0,32–0,42	0,80–1,20	≤0,50	4,50–5,50	1,00–1,50	—	0,30–0,50	
Baja Mo	0,25–0,35	≤0,50	≤0,60	2,50–3,50	2,50–3,50	—	0,30–0,60	
Baja W	0,25–0,35	≤0,40	≤0,60	2,00–3,00	—	5,00–6,00	0,30–0,60	
Baja pengerasan presipitasi	0,61–0,22	0,20–0,35	≤0,40	≤0,30	3,00–3,50			3,00–3,50

Baja	Perlakuan panas (°C)			Kekerasan		
	Dianil	Dicelup dingin	Ditemper	Dianil (H_B)	Dicelup dingin (H_RC)	Ditemper (H_RC)
Baja Cr	820–870 SC	1000–1050 AC	530–600 AC	≤229	50–55	≤51
Baja Mo	800–850 〃	1000–1050 〃	600–650 〃	≤235	42–55	≥40
Baja W	800–850 〃	1050–1100 〃	600–660 〃	≤235	—	≥45
			300–350 〃			30–40
Baja pengerasan presipitasi	780 〃	1000–1050 〃	580–620 〃	≤248	35–38	43–46

Catatan: SC: Pendinginan lambat. AC: Pendinginan udara

(1) Baja perkakas panas yang diperkuat dengan Cr

Baja ini mempunyai mampu keras yang baik, jadi meskipun ukurannya besar, dapat dikeraskan dengan udara. Ketahanan pada temperatur tinggi sedikit kurang dibandingkan dengan baja yang diperkeras oleh W. Tapi mempunyai ketahanan yang baik terhadap pemanasan berulang, dan pendinginan berulang dan sangat ulet. Kalau V ditambah 1% ketahanan pelunakan karena penemperan menjadi lebih tinggi jadi ketahanan panas dan tahanan terhadap kerugian karena fusi logam yang cair dapat diperbaiki. Dengan menambahkan 1% W kekuatan panasnya dapat diperbaiki.

(2) Baja perkakas panas yang diperkuat dengan Mo

Baja ini sangat mudah dikeraskan dengan pendinginan udara. Sifat-sifatnya ada di antara sifat baja tipe Cr dan tipe W, lebih kuat daripada tipe W dalam keadaan panas dan mempunyai keuletan yang lebih baik. Tetapi baja ini mudah mengalami dekarburisasi.

(3) Baja perkakas panas yang diperkuat dengan W

Mampu keras baja ini kurang baik tetapi dapat dikeraskan dengan pendinginan udara. Ketahanan pelunakan lebih baik pada temperatur tinggi tetapi kalau W bertambah konduktivitas panasnya berkurang yang menyebabkan lemah terhadap kelelahan termal. Dalam tipe ini telah dibuat baja yang ditambah dengan Co dengan maksud untuk memperbaiki kekuatan panas dan ketahanan impak.

(4) Pengerasan presispitasi baja perkakas panas

Setiap baja perkakas dapat mengalami pengerasan kedua pada waktu penemperan, hal ini hanya terjadi sedikit ada ketiga macam baja di atas. Tetapi baja tersebut mempunyai kekerasan yang rendah setelah dikeraskan, sementara itu pengerjaan pemesinan dapat dilakukan dengan mudah. Dengan presipitasi setelah pemesinan kekerasannya meningkat sangat. Pada umumnya baja tersebut ditemper sampai pada kekerasan yang lebih rendah daripada kekersan maksimum dan presipitasi berlanjut pada permukaan sehingga menjadi lebih keras. pada pengerasan presipitasi, kekerasan baja lainnya lebih rendah dan ketahanan ausnya juga kurang dibandingkan dengan baja tipe Cr.

Telah dikatakan di atas bahwa baja perkakas panas mengalami pengerasan kedua karena penemperan. Gb. 2.10 dan Gb. 2.21 menunjukkan perubahan kekerasan pada penemperan baja perkakas tipe Cr dan baja tipe pengerasan presipitasi.

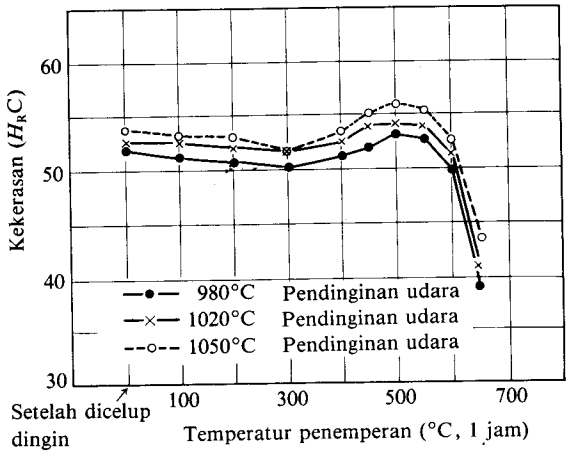
1.5.5 Baja kecepatan tinggi

Baja kecepatan tinggi mempunyai kekerasan panas dan ketahanan aus yang sangat baik di samping mempunyai sifat-sifat mekanik yang cukup baik, dengan demikian baja ini bukan saja dipergunakan sebagai bahan perkakas pemotong yang umum, tetapi juga untuk cetakan, rol, bagian mesin yang harus tahan aus dan berbagai macam perkakas lainnya. Baja kecepatan tinggi ditetapkan oleh standar yang hampir sama di semua negara. Tabel 2.8 menunjukkan ikhtisar dari komposisi kimianya. penggunaan perlakuan panas dan sebagainya. SKH2 (JIS), T1 (AISI) adalah komponen umum dari baja kecepatan tinggi dan disebut baja kecepatan tinggi 18-8-1 (W. Cr, V).

(1) C

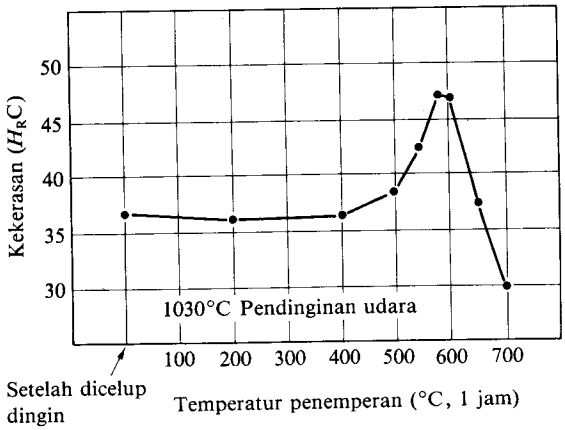
Dalam keadaan dikeraskan, sebagian C larut padat dalam matriks sebagian lain

Komposisi kimia (%)	C	Si	Cr	Mo	V
	0,37	1,07	5,10	1,41	1,00



Gb. 2.20 Kekerasan temper baja perkakas Cr.

Komposisi kimia (%)	C	Si	Mn	Ni	Mo	Cr
	0,19	0,30	0,30	3,2	3,1	0,2



Gb. 2.21 Kekerasan temper baja pengerasan presipitasi.

dalam bentuk senyawa dengan W, Cr dan V. C adalah unsur yang penting bagi baja kecepatan tinggi. Kalau kadar C rendah akan mengakibatkan pengerasan kedua yang kurang dan sebaliknya kalau kadar C terlalu tinggi akan menurunkan titik cair. Kalau temperatur pengerasan tidak diturunkan akan mengakibatkan struktur eutektik dan sangat getas. Kadar C harus diimbangi oleh unsur-unsur lainnya.

(2) Cr

Cr memperbaiki mampu keras dan memberikan unjuk kerja pemotongan yang terbaik pada prosentase 3,5 sampai 5%.

Tabel 2.8 Contoh komponen kimia utama dan perlakuan panas baja kecepatan tinggi.

Tanda		Komponen kimia (%)						Perlakuan panas (°C)		Kekerasan temper (H_RC)	Penggunaan
JIS	AISI	C	Cr	Mo	W	V	Co	Dicelup dingin	Ditemper		
SKH2	T1	0,70 –0,85	3,80 –4,50	—	17,00 –19,00	0,80 –1,20	—	1260 OC –1300	550 AC –580	≥62	Perkakas pemesinan umum dan lainnya.
SKH3	T4	0,70 –0,85	3,80 –4,50	—	17,00 –19,00	0,80 –1,20	4,50 –5,50	1270 〃 –1310	560 〃 –590	≥63	Perkakas pemesinan berat kecepatan tinggi dan lainnya.
SKH4B	T6	0,70 –0,85	3,80 –4,50	—	18,00 –20,00	1,00 –1,50	14,00 –16,00	1300 〃 –1350	580 〃 –610	≥64	Perkakas untuk pemesinan yang keras.
SKH10	T15	1,45 –1,60	3,80 –4,50	—	11,50 –13,50	4,20 –5,20	4,20 –5,20	1200 〃 –1260	540 〃 –580	≥64	Perkakas untuk pemesinan yang sangat keras dan lainnya.
SKH53	M3-1	1,10 –1,25	3,80 –4,50	4,80 –6,20	5,50 –6,70	2,80 –3,30	—	1200 〃 –1250	540 〃 –570	≥63	Perkakas untuk pemesinan bahan keras yang memerlukan keuletan dan lainnya.

Catatan: OC: Pendinginan minyak, AC: Pendinginan udara

(3) W

Sebagian W memberikan karbida ganda dengan C yang menghasilkan ketahanan aus, sebagian W larut padat dalam matriks dan meningkatkan mampu keras kedua karena penemperan.

(4) Mo

Mo hampir mempunyai sifat yang sama seperti W. Karbida Mo lebih halus daripada karbida W, mudah berbentuk bulat dan mempunyai keuletan yang baik. Tetapi mudah terdekarburisasikan dan membuat daerah temperatur perlakuan panas yang sempit, jadi perlu pengontrolan temperatur yang tepat.

(5) V

V membuat karbida yang sangat keras. Diperlukan perbandingan V dan C secara kwantitatif.

(6) Co

Co tidak membentuk karbida, jadi lebih efektif untuk meningkatkan jumlah C di dalam matriks dan memperbaiki kekerasan setelah ditemper dan kekerasan panas demikian juga ketahanan baja.

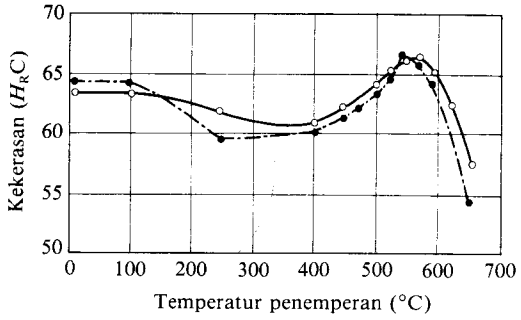
Bahan kecepatan tinggi mempunyai temperatur pengerasan yang paling tinggi dibandingkan dengan baja-baja lainnya, jadi harus ada pengontrolan yang ketat terhadap lingkungan, kenaikan temperatur dan waktu pencelupan. Selanjutnya perlu juga pengontrolan cara pendinginan setelah pengerasan seperti halnya telah dijelaskan untuk baja perkakas. Kemahiran yang paling tinggi diperlukan pada perlakuan panas baja ini. Gb. 2.22 menunjukkan contoh dari pengerasan kedua oleh penemperan bagi baja kecepatan tinggi tipe 18W-4Cr-1V.

1.6 Baja kekuatan sangat tinggi

Baja yang mempunyai kekuatan mulur di atas 1000 MPa, dan mempunyai kekuatan tarik di atas 2000 MPa dinamakan baja berkekuatan sangat tinggi, yang dikembangkan sebagai bahan untuk memenuhi permintaan perbandingan kekuatan/berat yang tinggi, yang diperlukan untuk pesawat terbang, bahan konstruksi untuk kendaraan ruang angkasa, baut kekuatan tinggi, konstruksi kedap tekanan, dsb. Kekuatannya harus lebih baik tanpa mengurangi keliatan dan keuletan-

	Komposisi kimia (%)					
	C	Cr	W	Mo	V	Co
●	0,77	3,86	18,20	—	0,98	—
○	0,79	4,14	17,41	0,57	1,00	—

Ukuran batang uji (mm)	Perlakuan panas
15 $mm^2 \times 10$ mm 1/2 $in^2 \times 90$ mm	Didinginkan di minyak dari 1280°C, dan ditemper 1 jam tiga kali.



Gb. 2.22 Perubahan kekerasan karena penemperan baja kecepatan tinggi 18-4-1.

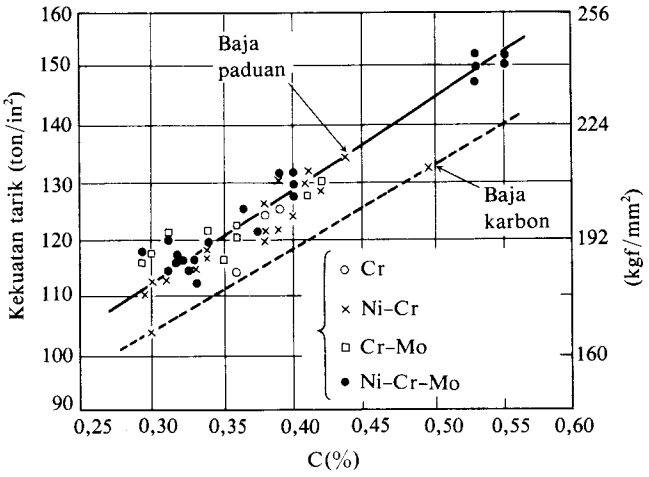
nya, oleh karena itu berbagai usaha dikembangkan dalam pemaduan unsur dan perlakuan panasnya.

1.6.1 Baja martensit

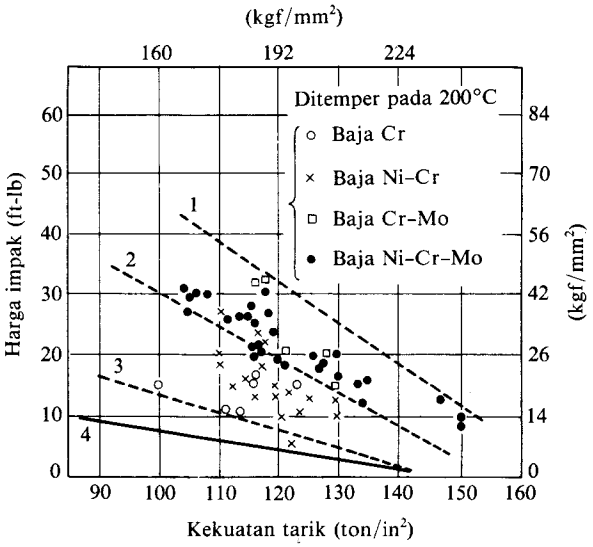
Baja konstruksi yang dikeraskan dan ditemper pada daerah temperatur penemperan yang rendah yang tidak menyebabkan pelunakan temper untuk mendapat kekuatan yang sangat tinggi, baja ini dinamakan baja martensit. Kekerasan martensit ditentukan oleh besarnya kadar karbon, tetapi kalau C tinggi keliatan dan keuletannya menjadi lebih rendah, oleh karena itu bagi baja konstruksi kadar karbon biasanya dibuat sekitar 0,3-0,5%.

Pada tahap pertama penemperan martensit terjadi presipitasi karbida ε*, dengan demikian terjadi pengerasan presipitasi, atau penguatan dispersi, sementara itu penguatan oleh kelarutan karbon pada martensit menurun, jadi hampir tidak terjadi perubahan kekuatan. Walaupun demikian keuletannya diperoleh kembali. Gb. 2.23 dan 2.24 menunjukkan hubungan antara kekuatan tarik dengan kadar karbon demikian juga dengan harga impact dari baja paduan martensit yang ditemper pada 200°C. Pada kadar karbon yang sama, martensit baja paduan mempunyai kekuatan yang lebih tinggi, dan pada kekuatan yang sama, harga impak menjadi tinggi menurut urutan baja Cr, Ni-Cr, dan Ni-Cr-Mo sesuai dengan jumlah unsur paduannya. Jadi baja berkekuatan sangat tinggi telah dikembangkan, yaitu baja karbon medium martensit dengan kekuatan tinggi dan keuletan yang tinggi disebabkan oleh penam-

*Karbida ε adalah heksagonal dengan komposisi mendekati $Fe_{2,4}C$, yang dipresipitasikan dalam suatu hubungan mengarah dalam martensit. Dalam waktu bersamaan martensit berubah dari tetragonal ke heksagonal. Hubungan ini terjadi sampai temperatur di atas 150°C.



Gb. 2.23 Hubungan antara kekuatan tarik dan kadar karbon dari martensit yang ditemper pada 200 °C. Baja karbon dibandingkan dengan baja paduan. (K. J. Irvin et al.: JISI *196* (1960), 66 J. D. Murray: ISI Spec. Rep. No. 76 (1962), 41)



Gb. 2.24 Hubungan antara kekuatan tarik dan harga impak dari baja martensit ditemper pada 200 °C. Baja paduan dibanding dengan baja karbon. (Ref.: sama dengan Gb. 2.23)

bahan unsur-unsur paduan. Tabel 2.9 menunjukkan komponen dan sifat-sifat mekanik dari beberapa baja berkekuatan sangat tinggi.

Kalau Si ditambahkan pada baja martensit, akan merubah temperatur transformasi dari karbida ke sementit ke temperatur yang lebih tinggi demikian juga daerah getasan pada temperatur 500°F (260°C) bergeser ke temperatur yang lebih tinggi. Jadi baja yang mengandung Si mungkin bisa ditemper pada atau di atas 200°C dan keuletannya dapat diharapkan menjadi lebih baik oleh penemperan pada temperatur penemperan yang lebih tinggi. Pada saat ini kebanyakan baja martensit dan baja berkekuatan sangat tinggi adalah baja Ni-Cr dan baja Ni-Cr-Mo, yang ditunjukkan

Tabel 2.9 Baja martensit.

Baja	Komposisi kimia (%)								Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Kekuatan mulur (0,2%) (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Pengurangan luas (%)
	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	Lainnya				
Ni-Cr-Mo	0,38 -0,43	0,20 -0,35	0,60- 0,80	0,70 -1,90	0,20 -0,30	1,65 -2,00	—	—	180	150	8	30
Si-Cr-Mo-V	0,40	2,3	1,3	1,4	0,35	—	0,20	—	202	169	10	35
9Ni-4Co-45C	0,45	0,1	0,25	0,3	0,3	8,5	0,1	4 Co	180	150	—	—

dalam Tabel, baja 9% Ni–4% Co juga telah dikembangkan.

1.6.2 Baja pengerasan kedua

Seperti telah diuraikan pada baja kecepatan tinggi, pengerasan kedua disebabkan karena presipitasi karbida dari unsur-unsur paduan yang mempunyai kelarutan rendah pada sementit seperti Mo, V, W, Ti, Nb dan Ta. Penambahan Mo atau V, paling sering dilakukan dan penambahan simultan dari Cr memberikan presipitasi karbida yang halus dan terdispersikan merata, jadi tipe baja yang utama adalah baja Cr–Mo–V, yaitu baja 5% Cr–Mo–V sebagai contoh utama. Seperti telah dikemukakan mengenai baja perkakas panas yaitu baja Cr, Tabel 2.10 menunjukkan contoh dengan sifat-sifat mekaniknya.

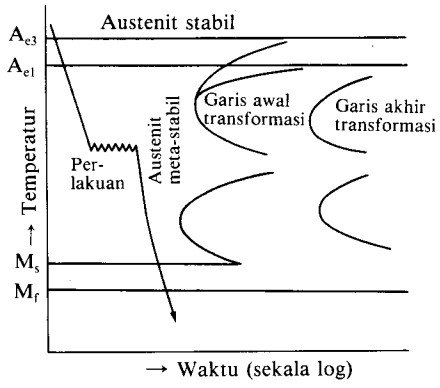
Tabel 2.10 Contoh baja dengan pengerasan kedua.

Baja	Komposisi kimia (%)					Kekuatan mulur (0,2%) (kgf/mm^2)	Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Pengurangan luas (%)
	C	Si	Cr	Mo	V				
5 Cr–1,5Mo–V	0,35	1,00	5,00	1,50	0,40	155	200	10	24

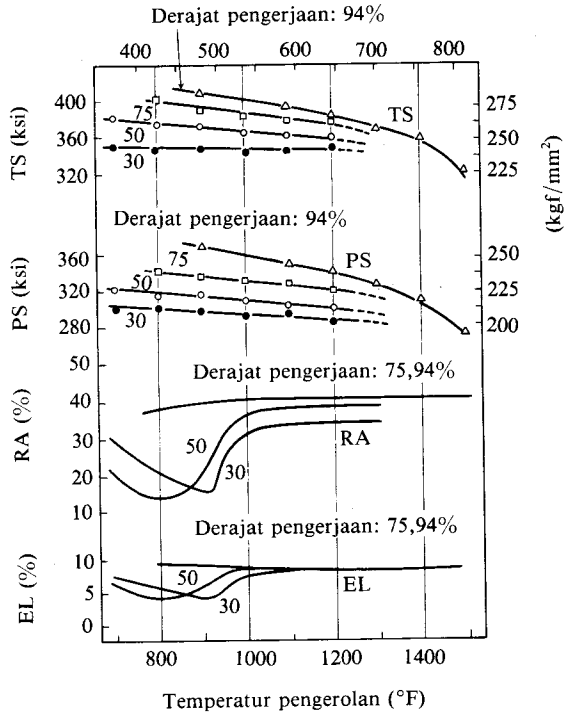
1.6.3 Baja olah austenit

Kalau baja diaustenitkan, kemudian dicelup dingin pada temperatur di bawah titik transformasi dan dibiarkan, untuk sementara waktu austenit berada dalam keadaan metastabil, dan setelah waktu inkubasi tertentu terjadi transformasi. Dengan merubah-rubah keadaan di atas transformasi dibiarkan pada temperatur tetap, maka diagram transformasi isotermal yang dinamakan diagram S dapat dibuat. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 2.25, proses di mana struktur martensit didapat dengan pencelupan dingin yang tiba-tiba setelah dibiarkan berada sebagai austenit yang metastabil, proses ini disebut proses oleh austenit (*ausforming*).

Martensit yang dibuat dengan olah austenit, dibandingkan dengan martensit yang didapat dengan proses biasa, mempunyai struktur mikro yang halus, cacat kisinya yang sangat banyak, dan kekuatan yang sangat tinggi. Jadi kalau baja ini ditemper, akan didapat kekuatan, keliatan dan keuletan yang tidak bisa dicapai oleh proses pengerasan dan penemperan baja yang biasa. Untuk mendapat sifat-sifat yang sangat baik perlu pemilihan baja, yaitu yang mempunyai waktu permulaaan transformasi yang lebih lama dari perlit dan bainit, suatu daerah austenit metastabil di dalam S, dan yang akan menjadi fasa martensit karena pencelupan dingin. Baja yang memenuhi persyaratan tsb ialah baja 5Cr–1,5Mo–V, 3Cr–1,5Ni, Ni–Cr–Mo, 13Cr dan yang mungkin mengandung C sampai kadar tertentu.



Gb. 2.25 Kurva transformasi isotermal (kurva S) dan perlakuan *aus-forming* baja.



Catatan:
EL: perpanjangan,
RA: pengurangan luas
PS: tegangan mulur
TS: kekuatan tarik

Gb. 2.26 Perubahan kekuatan, perpanjangan dan pengurangan luas baja 5% Cr–1,3% Mo–0,5% V–0,4% C. Didinginkan cepat dari 350–650 °C, proses di "aus forming". Martensit ditemper pada 501 °C. Baja yang dicelup dingin dan ditemper mempunyai kekuatan mulur 169 kgf/mm² dan kekuatan tarik 218 kgf/mm².

Gb. 2.26 menunjukkan hubungan dari temperatur olah austenit dan derajat pengerjaan dengan sifat-sifat mekaniknya dari baja 5 Cr–1,5 Mo–V.

Jadi walaupun setelah ditemper kira-kira 500°C baja berkekuatan tinggi dengan kekuatan mulur di atas 200 kg/mm² dapat diperoleh. Dengan olah austenit kekuatan dapat ditingkatkan kira-kira 50 kg/mm², hal ini lebih dari pada untuk proses pengerasan dan penemperan biasa dan sebagai tambahan pada harga impact yang tinggi dan temperatur transisi yang rendah juga diperoleh kekuatan kelelahan yang tinggi menunjukkan sifat-sifat yang sangat baik bagi bahan konstruksi.

Baja yang diolah austenit dipergunakan untuk pesawat terbang, pesawat ruang angkasa, senjata dan komponen-komponen berputar, dan dipergunakan untuk, roket, kerangka motor, pelat baja tahan peluru, batang torak, pegas pelat, baut-baut dan sebagainya.

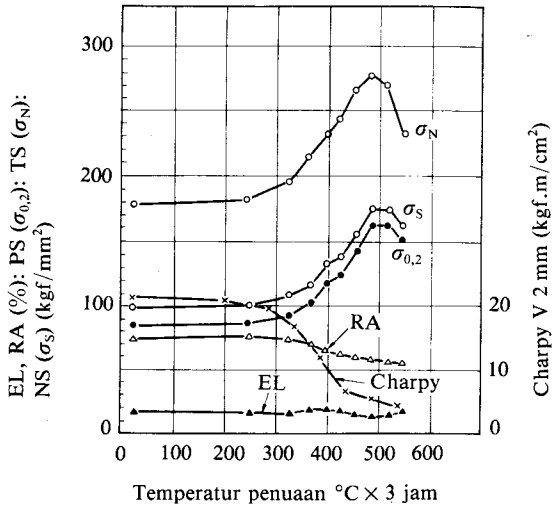
1.6.4 Baja maraging

Baja yang terutama terdiri dari Fe–18%Ni dengan unsur paduan Mo, Co, Ti, Al, Nb, dsb, di mana martensit diperkuat oleh presispitasi senyawa antar logam dari unsur-unsur tersebut dinamakan baja maraging. Komposisi dan sifat-sifat mekanik dari baja tersebut ditunjukkan dalam Tabel 2.11. Pada umumnya martensit yang hanya mempunyai dislokasi sebagai cacat kisi dinamakan martensit lath, dan martensit yang hanya mempunyai transformasi kembar sebagai cacat kisi utamanya dinamakan martensit asirkular. Keuletan dan harga impak baja macam yang pertama adalah sangat baik, dan baja maraging sangat kuat dan ulet kalau hanya terdiri dari struktur martensit lath saja, di dalam matriks di mana partikel senyawa antarlogam yang halus berpresipitasi. Unsur-unsur pengotor lainnya selain dari pada unsur-unsur paduan ditunjukkan di dalam tabel, seperti C, Si, Mn, P, S, dsb, harus dikontrol sekecil mungkin.

Kalau paduan 18% Ni–Fe dengan kadar karbon yang rendah didinginkan dari austenit, martensit terbentuk pada temperatur yang sangat tinggi, dan dengan pendinginan udara ia menjadi satu yaitu martensit. Ini berarti bahwa pengaruh masa yang menjadi masalah pada saat pencelupan dingin seringkali terlupakan. Kekuatan baja setelah transformasi martensit kira-kira 110 kg/mm^2, keuletannya sangat tinggi dan

Tabel 2.11 Contoh baja maraging.

Baja	Komposisi kimia (%)						Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Pengurangan luas (%)
	Ni	Co	Mo	Ti	Al	Lainnya			
Kelas 18Ni 250 ksi	18,0	8,0	5,0	0,50	0,10		175	12	55
Kelas 18Ni 350 ksi	18,0	12,0	4,5	1,50	0,10		240	10	50
Maraging 25Ni	25,0			1,50	0,20	0,5Nb	190	11	50
Maraging 12–5–3	12,0		3,0	0,30	0,20	5,0Cr	140	12	55



Catatan: EL: perpanjangan, RA: pengurangan luas
PS: tegangan mulur, TS: kekuatan tarik
NS: kekuatan tarik

Gb. 2.27 Hubungan antara temperatur penuaan dan sifat-sifat kimia baja *maraging* 18%Ni yang ditemper.
(Hosomi et. al.: Technical Report of Kobe Steel *21* (1972) 12)

perbandingan pengerasan regangan sangat kecil, yang memberikan kemudahan pada pengerasan regangan.

Kalau martensit tersebut dituakan pada temperatur 500°C, ia akan menjadi sangat keras seperti ditunjukkan pada Gb. 2.27. Senyawa antar logam yang menyebabkan pengerasan yaitu Ni_3Mo, Fe_2Mo, NiTi, dsb, dan berukuran di bawah 100 Å yang boleh dikatakan halus sekali dan dipresipitasikan secara merata pada dislokasi. Akan tetapi dalam banyak kasus senyawa antar logam yang sempurna belum jelas, di sini hanya dikemukakan sebagai akibat dari presipitasi.

Pada saat ini baja maraging dipergunakan untuk pesawat terbang, pesawat ruang angkasa, tabung bertekanan tinggi, perkakas, konstruksi mekanik, dsb. Baja ini merupakan bahan yang diharapkan bisa dipergunakan di masa yang akan datang.

1.7 Baja tahan karat

Salah satu cacat pada penggunaan baja adalah terjadinya karat, yang biasanya dicegah dengan mempergunakan pelapisan dan pengecatan. Baja tahan karat adalah semua baja yang tidak dapat berkarat. Banyak di antara baja ini yang digolongkan secara metalurgi menjadi baja tahan karat austenit, baja tahan karat ferit, baja tahan karat martensit dan baja tahan karat tipe pengerasan presipitasi.

1.7.1 Pengaruh unsur-unsur paduan pada ketahanan karat dari besi

Kalau Cr dipadukan pada besi di atas 12–13%, karat yang berwarna merah tidak terbentuk, karena oleh adanya oksigen di udara terjadi permukaan yang stabil (permukaan pasif). Oleh karena itu baja yang mengandung unsur tersebut dinamakan baja tahan karat. Kalau baja mengandung lebih dari 17% Cr akan terbentuk suatu lapisan yang stabil. Karat pada lasan dari baja tahan karat 17% Cr sering terjadi disebabkan karena presipitasi karbida Cr pada batas butir dan oksidasi Cr dari permukaan karenanya lapisan permukaan menjadi kekurangan Cr yang mengurangi ketahanan karatnya.

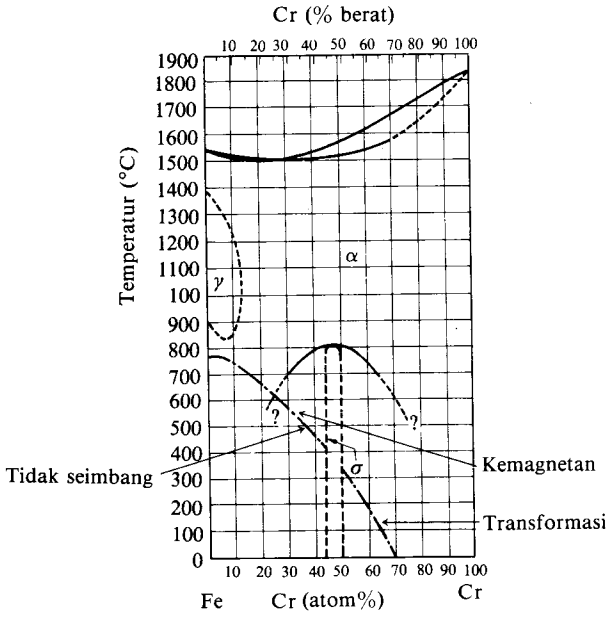
Kalau Ni dipadukan pada besi, kehilangan berat yang disebabkan korosi di dalam asam berkurang dan ketahanan korosi bisa diperbaiki.

Baja tahan karat adalah baja paduan yang memanfaatkan keefektifan unsur paduan tersebut seperti Cr dan Ni dan dapat dibagi menjadi sistim Fe–Cr dan Fe–Cr–Ni. Yang pertama termasuk baja tahan karat martensit dan ferit dan yang terakhir baja tahan karat austenit. Biasanya Mo, Cu, dsb. ditambahkan kepada baja ini untuk memenuhi maksud tertentu pada penggunaan.

1.7.2 Struktur baja tahan karat

Memperhatikan unsur Cr, yang menjadi komponen utama pada baja tahanan karat, diagram fasa Fe–Cr ditunjukkan dalam Gb. 2.28. Cr dapat larut dalam besi memperluas daerah α (ferit). Dalam baja dengan 12%Cr pada temperatur di atas 900°C terjadi fasa γ (austenit). Dalam paduan yang nyata, C dan N juga terkandung, jadi fasa γ diperluas ke daerah yang mempunyai konsentrasi Cr lebih tinggi. Baja tahan karat 12%Cr biasa dipakai, diaustenitkan dari 900 sampai 1000°C tergantung kadar C nya, dan dicelup dingin pada minyak. Sehingga mempunyai struktur martensit ia menjadi baja tahan karat.

Dari Gb. 2.28 baja 18%Cr seharusnya mempunyai fasa α dimulai dari temperatur pembekuan sampai temperatur kamar, tetapi karena sebenarnya mengandung 0.03–

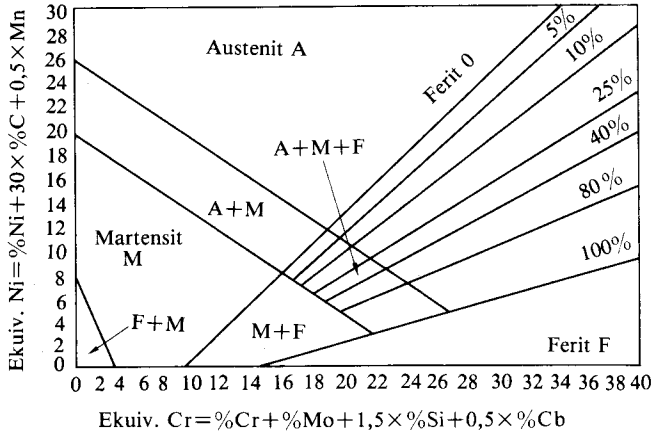


Gb. 2.28 Diagram tasa Fe-Cr.

0,10%C dan 0,01-0,02%N, maka kira-kira di atas 930°C terbentuk fasa γ. Oleh karena itu perlakuan panas untuk mendapat fasa α dilakukan di bawah 850°C, baja ini dinamakan baja tahan karat ferit.

Struktur baja 18%Cr-8%Ni adalah struktur dua fasa dari $\alpha+\gamma$ dalam keseimbangan, tetapi kenyataannya pada kira-kira 1050°C seluruhnya menjadi austenit dan setelah pendinginan dalam air atau dalam udara fasa γ terbentuk pada temperatur kamar sukar bertransformasi ke fasa α, baja ini dinamakan baja tahan karat austenit. Fasa γ merupakan fasa metastabil, sebagai contoh kalau diadakan deformasi plastik bisa terjadi transformasi martensit. Kalau baja dipergunakan dalam bentuk austenit, maka perlu diadakan perlakuan panas untuk membentuk austenit tadi setelah dilakukan deformasi plastik, atau perlu dipakai baja yang mengandung lebih banyak Ni untuk memberikan kestabilan pada fasa austenit.

Untuk mengetahui hubungan dari fasa logam yang ada pada lasan, yang mem-



Gb. 2.29 Diagram struktur dari baja tahan karat yang dideposisikan. (Diagram Shaeffler)

punyai

Cr ekuivalen = %Cr + %Mo + 1,5 × %Si + 0,5 × %Nb, dan

Ni ekuivalen = %Ni + 30 × %C + 0,5% Mn

pada kedua sumbu, diagram Schaeffer menunjukkan hubungan tersebut dan ditunjukkan pada Gb. 2.29.

1.7.3 Pemilihan baja tahan karat

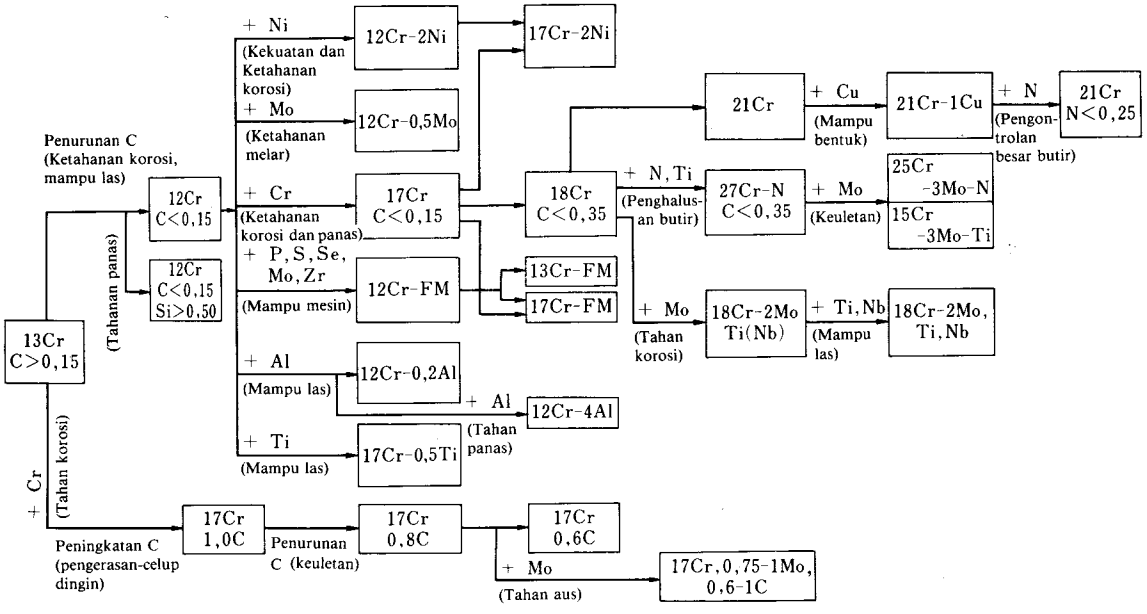
(1) Baja tahan karat martensit

Gb. 2.30 menunjukkan klasifikasi baja tahan martensit dan baja tahan karat ferit. komposisi baja tahan karat martensit adalah 12–13%Cr dan 0,1–0,3%C. Kadar Cr sebanyak ini adalah batas terendah untuk ketahanan asam karena itu baja ini sukar berkarat di udara, tetapi ketakanan karat dalam suatu larutan juga cukup.

Sampai 500°C, baja ini banyak dipakai karena mempunyai ketahanan panas yang baik sekali, dan dengan pengerasan dan penemperan dapat diperoleh sifat-sifat mekanik yang baik, oleh karena itu baja ini dapat dipakai untuk alat pemotong, perkakas, dsb.

(2) Baja tahan karat ferit

Menurut klasifikasi dalam Gb. 2.29 baja tahan karat ferit adalah baja yang terutama mengandung Cr sekitar 16–18% atau lebih. Kebanyakan komponen dibuat dari pelat tipis, sebagai bahan untuk bagian dalam dari suatu konstruksi, untuk peralatan dapur, untuk komponen trim mobil bagian dalam, dsb. Perlu diperhatikan bahwa pada lingkungan korosi yang ringan tidak terjadi karat, tetapi berada pada air larutan yang netral, dapat terjadi korosi lubang atau krevis kalau terdapat sedikit ion klor, atau kalau ada struktur berbentuk krevis. Pelat tipis dari baja ini menyebabkan tanda regangan spesifik yang disebut *ridging* disebabkan oleh tarikan atau penarikan dalam, hal ini memberikan permasalahan pada pembuatan peralatan



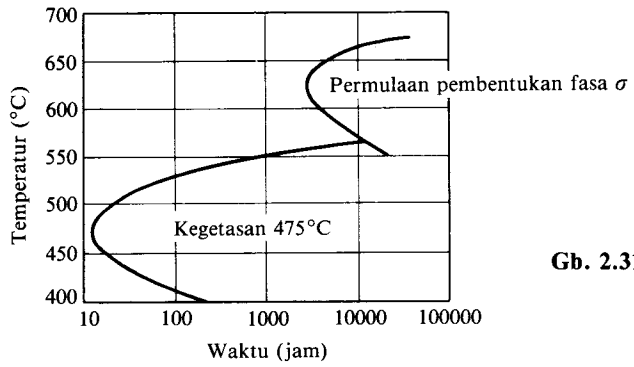
Gb. 2.30 Diagram klasifikasi baja tahan karat ferit dan martensit.

dapur, tetapi sekarang sebagi hasil dari berbagai studi, permasalahan tersebut mungkin dapat dipecahkan.

Sifat yang sangat menguntungkan dari baja tahan karat ferit adalah bahwa tanpa kandungan Ni sukar untuk terjadi retakan korosi tegangan. Yaitu bahwa kalau ketahanan korosi baja tahan karat ferit dibuat sama atau lebih baik dari pada baja tahan karat austenit, akan lebih menguntungkan apabila dipakai baja tahan karat ferit daripada baja tahan karat austenit, yang lebih mudah terjadi retakan korosi tegangan. Selanjutnya ketahanan korosi lubang bertambah kalau Cr dan Mo ditambahkan lebih banyak jadi sebagai pengganti Ni yang mahal maka dipakai baja 18%Cr-1%Mo, 18-19%Cr-2%Mo, dsb, untuk komponen trim bagian luar mobil atau komponen pemanas air. Untuk permintaan dengan persyaratan yang lebih tinggi dapat dipakai baja 26%Cr-1%Mo, dsb.

Selanjutnya baja tahan karat ferit yang mengandung lebih dari 18%Cr adalah getas tetapi keuletannya tergantung kepada jumlah kadar C dan N. Sekarang berkat kemajuan teknik pembuatan baja dapat dibuat dengan mudah baja 18-19%Cr dengan kadar $C+N<0{,}02\%$, jadi perkembangan permintaan yang akan baja ini di masa datang telah pasti.

Seperti ditunjukkan dalam Gb. 2.31, baja tahan karat ferit mengandung 15%Cr atau lebih, getas pada 457°C karena pemanasan yang lama pada 400-500°C, dan kalau dipanaskan agak lama pada 600-650°C terjadi kegetasan fasa σ sehingga perlu menghindari daerah temperatur ini.



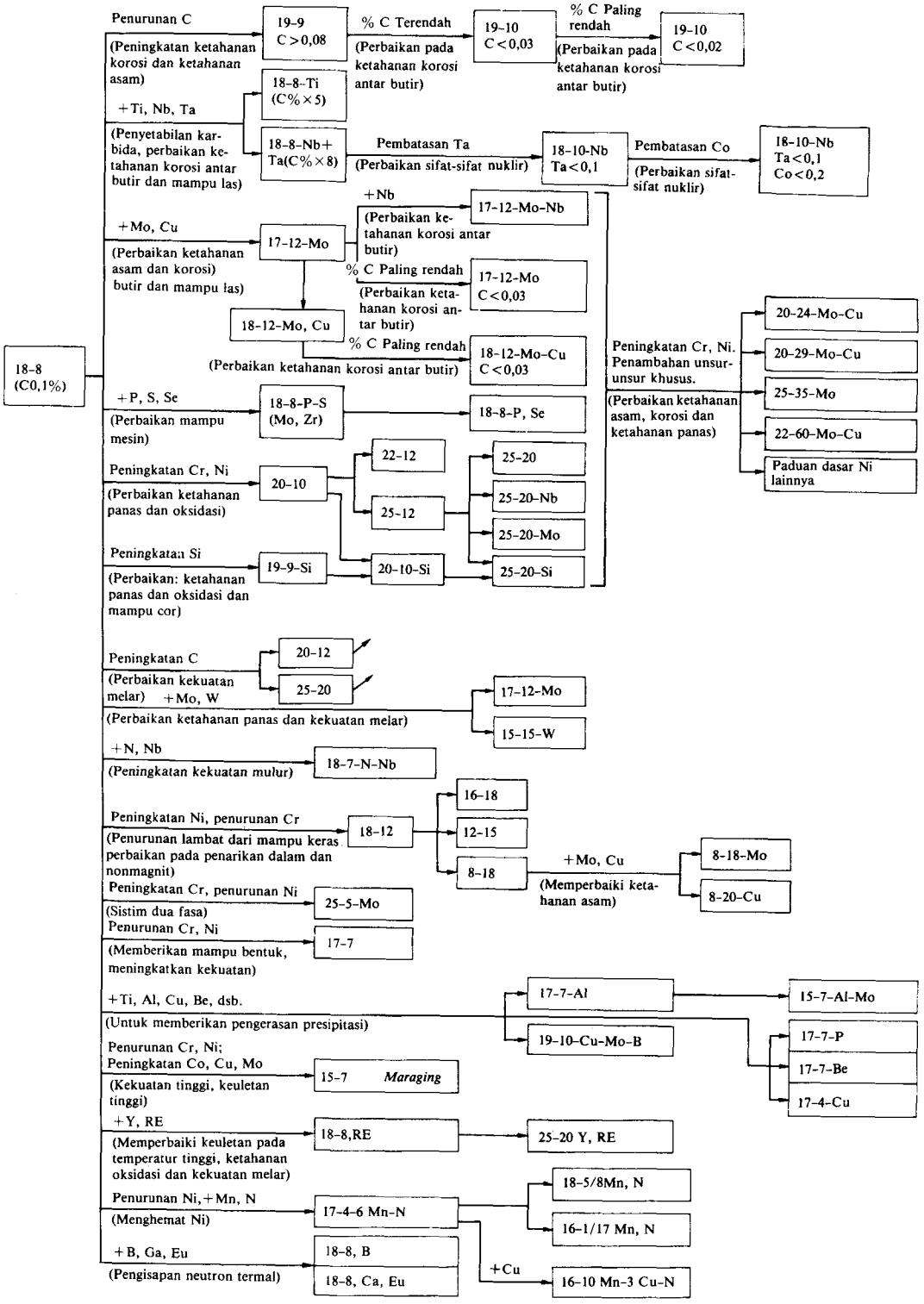
Gb. 2.31 Hubungan antara temperatur mula dan waktu pembentukan fasa σ dan kegetasan 475°C pada baja Cr tinggi.

(3) Baja tahan karat austenit

Gb. 2.32 menunjukkan klasifikasi baja tahan karat austenit. Sistim ini dinyatakan dengan baja 18%Cr-8%Ni disebut baja tahan karat delapan belas delapan. Baja tahan karat austenit lebih baik pada ketahanan korosinya, mampu bentuk dan mampu lasnya, karena itu dipakai pada berbagai industri kimia. Selain itu, dipakai untuk bahan konstruksi, perabot dapur. turbin, mesin jet, mobil, komponen berputar, bangunan kapal, reaktor atom, dst.

Baja tahan karat austenit meskipun lebih baik ketahanan korosinya tapi harus berhati-hati pada penggunaannya karena kekurangannya seperti dikemukakan di bawah ini.

1) Korosi antarbutir
2) Korosi lubang dan krevis
3) Retakan korosi tegangan



Gb. 2.32 Bagan klasifikasi baja austenit tahan karat.

(a) Korosi antar butir

Korosi antar butir disebabkan oleh presipitasi karbida Cr pada batas butir, yang menyebabkan daerah kekurangan Cr di dekatnya, dari daerah tersebut korosi dimulai. Dalam keadaan tertentu karbida Cr sendiri kena korosi. Karbida Cr berpresipitasi pada daerah temperatur 500–900°C, pada 600–800°C paling tinggi. Sebagai contoh, derajat korosi antar butir dipelajari dengan pengujian korosi dari batang uji yang dipanaskan pada 600°C, yang disebut perlakuan sensitisasi. Korosi antar butir ini terjadi di daerah yang dipengaruhi panas pada lasan, yang menjadikan permasalahan. Karena hal tersebut disebabkan oleh terbentuknya karbida Cr, masalah tersebut dapat diatasi dengan mempergunakan baja berkadar karbon rendah yang dipadu dengan Ti atau Nb yang merupakan unsur pembentuk karbida yang kuat untuk menghindari terjadinya karbida Cr.

(b) Korosi lubang dan krevis

Korosi lubang disebabkan oleh retakan lapisan yang pasip. Bagian yang pecah dari lapisan menjadi rusak karena konsentrasi, yang membentuk lubang. Kerusakan pasip disebabkan oleh adanya ion klor. Dalam hal ini korosi yang terjadi pada permukaan logan tanpa suatu pertumbuhan spesifik disebut korosi lubang, dan korosi yang menyebabkan pecahnya lapisan pasip setempat karena pengurangan pH pada permukaan kontak dengan benda lain, disebut korosi krevis. Agar tahan terhadap terjadinya lubang diperlukan kombinasi yang tepat dari Cr dan Mo. Dipandang dari sudut ini baja tahan karat ferit lebih menguntungkan. Baja tahan karat austenit yang mengandung 2–4%Mo banyak dipakai sebagai baja tahan yang tahan korosi lubang.

(c) Retakan korosi regangan

Retakan korosi regangan ialah retakan oleh korosi lokal dari lapisan pasip yang pecah karena tegangan tarik.

Pada baja tahan karat austenit retakan korosi regangan sangat menyusahkan karena bersamaan dengan korosi lubang. Lingkungan yang utama adalah yang mengandung klorida, sulfida, air dengan temperatur dengan tekanan tinggi, dan soda kaustik.

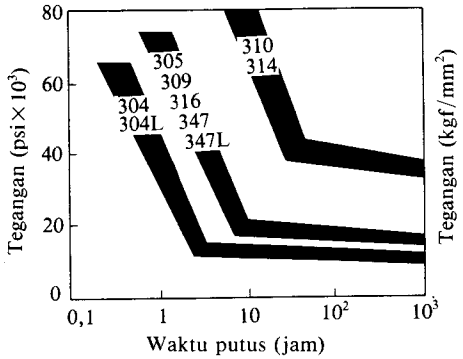
Pengujian retakan korosi tegangan sering dilakukan dengan pembebanan pada kelarutan 42% magnesium klorida yang mendidih. Salah satu sebagai hasil pengujian ditunjukkan dalam Gb. 2.33. Peningkatan Ni, C dan penambahan Si dsb. memberikan pengaruh efektif, dan dengan adanya P, N atau sedikit molibden memberikan pengaruh jelek. Kebanyakan memberikan patahan antar butir, dengan mengurangi kadar karbon dan penambahan unsur penyetabil karbid, memberikan pengaruh yang efektif.

(4) Baja tahan karat berfasa ganda

Sekarang banyak dipakai baja tahan karat yang berfasa ganda yaitu terdiri dari fasa austenit dan ferit. Umumnya mempunyai komposisi 25%Cr-5%Ni-1,5%Mo-0,03%C.

Dalam baja tahan karat berfasa ganda kegetasan mampu las dan kekurangan lainnya dari baja krom tinggi diperbaiki dengan penambahan Ni, N, dsb. Perkembangan baru-baru ini dalam teknik pembuatan baja memungkinkan pembuatan baja macam ini di mana pengurangan kadar karbon lebih mudah. Perbandingan antara fasa austenit dan ferit biasanya 4–6: 6–4 tergantung kepada komposisi dan perlakuan panasnya.

Baja tahan karat befasa ganda mempunyai sifat bahwa fasa austenit dan ferit masing-masing memberikan pengaruh saling menutupi. Sebagai contoh, tegangan mulur



304: 18-8, 304L: C yang sama rendahnya
305: 18-11, 309: 23-14, 316: 17-12-2Mo,
347: 18-11-Ti-Nb-Ta, 347L: C yang sama rendahnya
310: 25-10, 314: 24-20
(Gambar pertama menunjukkan kadar Cr rendah, yang kedua kadar Ni).

Gb. 2.33 Pengaruh tegangan pada waktu patah dari baja tahan karat dalam larutan 42% MgCl yang mendidih.

yang rendah dari fasa austenit dipertinggi dengan adanya fasa ferit, dan keuletan rendah dari fasa ferit diperbaiki oleh fasa austenit. Ketahanan korosi umumnya melebihi ketahanan korosi baja tahan karat 18–8, terutama baja yang mempunyai kadar Cr tinggi dan mengandung molybden Mo sangat baik dalam ketahanan korosi lubangnya; sehingga baja macam ini bisa dipakai untuk penukar panas yang mempergunakan air laut. Karena baja ini mempunyai kekurangan yaitu sifat pengerjaan panasnya yang kurang baik, maka perlu diadakan studi lebih lanjut mengenai teknik produksinya.

(5) Pengerasan presipitasi baja tahan karat

Dengan mempergunakan ketahanan korosi yang baik dari baja tahan karat, kekuatannya telah diperbaiki dengan pengerasan presipitasi. Menurut struktur matriksnya baja tahan karat ini digolongkan menjadi macam martensit, macam semi austenit dan macam austenit. Salah satu macam yang umum adalah 17-4 PH (martensit, 17%Cr-4%Ni-4%Cu-0,06%C-0,35%Nb) dan 17-7 PH (semi asutenit, 17%Cr-7%Ni-1,2%Al-0,07%C).

Matriks dari kedua macam baja tersebut pada saat pengerasan presipitasi adalah martensit. Pada macam yang pertama martensit terbentuk oleh pendinginan setelah perlakuan pelarutan, sedangkan pada macam yang kedua martensit terbentuk dengan jalan transformasi plastis setelah perlakuan pelarutan atau dengan pendinginan di bawah temperatur kamar. Kalau dituakan pada 400–600°C, pada macam yang pertama diperkuat dengan adanya presipitat yang kaya oleh Cu dan dalam hal yang kedua oleh adanya senyawa Ni-Al. Baja ini sangat baik pada ketahanan korosinya dibandingkan dengan baja krom 18%Cr. Baja ini dipergunakan untuk roda gigi, poros, pompa-pompa untuk mengalirkan asam, katup, kulit luar dari pesawat terbang komponen mesin jet, pegas, dsb.

1.8 Baja tahan panas dan paduan tahan panas yang super

Penggunaan baja tahan panas sangat luas termasuk pada ketel uap untuk pembangkit tenaga listrik, turbin uap dan turbin gas, berbagai reaktor untuk industri ki-

mia dan reaktor untuk tenaga atom, terutama penting untuk bahan konstruksi pembangkit tenaga. Karena bahan-bahan ini cenderung dipakai dalam temperatur tinggi dan tekanan tinggi dalam skala besar, atau dipakai dalam lingkungan yang khusus, umpamanya dalam pembangkit tenaga nuklir, dsb, banyak diminta bahan yang mempunyai persyaratan tertentu dalam lingkup yang luas, jadi penyempurnaan dan pengembangan bahan tersebut maju pesat.

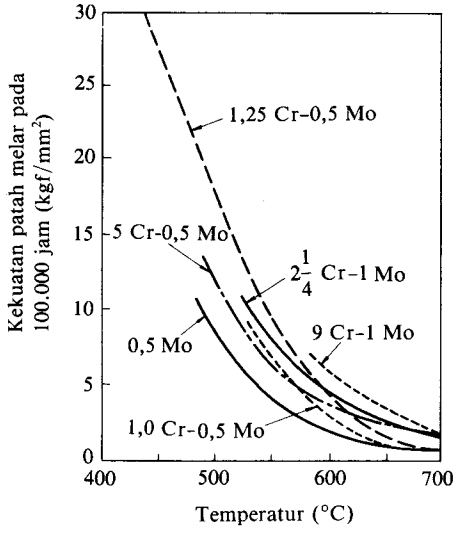
Pada umumnya sifat-sifat yang diminta bagi bahan yang tahan panas adalah sebagai berikut:

1) Sifat-sifat mekanis, yaitu kekuatan panas yang tinggi (kekuatan melar) untuk bisa bertahan temperattur tinggi dalam waktu yang lama, keuletan dan keliatan yang libih baik, mempunyai ketahanan yang kuat untuk kelelahan pada temperatur tinggi dan ketahanan terhadap kejutan termal dan mempunyai sensitivitas yang kurang terhadap takikan.
2) Sifat-sifat kimia, yaitu mempunyai ketahanan yang baik terhadap korosi dan oksidasi pada temperatur tinggi dan mempunyai stabilitas yang baik di dalam lingkungan di mana bahan ini dipergunakan.
3) Sifat-sifat fisik, koefisien pemuaian panas yang rendah dan berat jenis yang rendah, dan mempunyai konduktivitas termal yang besar.
4) Mudah dicairkan, mudah dicor, mudah ditempa dan juga lebih mudah dilas, dibengkokkan dsb.
5) Mempunyai harga yang murah.

Sifat-sifat dasar pada 1) dan 2) adalah sifat-sifat yang diminta untuk dapat lebih baik, berdasarkan itu tegangan perencanaan dapat ditetapkan.

1.8.1 Baja tahan panas ferit

Baja tahan panas ferit adalah baja Mo, Cr-Mo, Cr-Mo-V, Cr-Mo-V-W, 12% Cr, dan baja Si-Cr, dsb. Baja yang kedua pertama biasanya dipakai untuk ketel uap, dan baja Cr-Mo-V, dan Cr-Mo-W-V adalah untuk turbin uap, baja 12%Cr untuk sudu-sudu berputar dari turbin uap dan lain-lainnya. Baja Si-Cr dipergunakan untuk katup mobil. Gb. 2.34 menunjukkan bubungan antara kekuatan putus dengan temperatur pada 10^5 jam dari baja Mo dan baja Cr-Mo. Seperti telah dikemukakan pada bagian 1, standar dari kekuatan pemelaran didasarkan pada kekuatan pada 10^5 jam.



Gb. 2.34 Hubungan antara kekuatan patah melar dan temperatur pada 10^5 jam dari baja Mo, Cr-M.

Tabel 2.12 Contoh komposisi kimia dan kekuatan patah melar dari baja ferit tahan panas.

Baja	Komposisi kimia utama (%)	Kekuatan patah melar (kgf/mm^2)						
		550°C		600°C		650°C		
		100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	10000 jam
17-22AV	0,28C-1,25Cr-0,50Mo-0,85V	—	—	33,0	20,0	17,8	9,8	—
H40	0,25C-3,00Cr-0,50Mo-0,50W-0,75V	42,4	38,0	25,0	20,5	19,6	9,4	—
Rex448	0,15C-10,50Cr-0,75Mo-0,15V-0,45Nb	44,0	40,0	36,5	25,9	22,0	14,6	5,0
SUH600	0,22C-12,00Cr-1,0Mo-1,0W-0,25V	42,0	36,0	28,0	22,0	17,5	11,9	6,5
TAF	0,20C-10,50Cr-1,5Mo-0,25V-0,15Nb-0,02N-0,04B	51,0	45,0	34,0	28,0	25,0	19,0	14,5
SUH3	0,40C-2,0Si-11,0Cr-1,0Mo	—	—	20,0	15,0	8,9	5,7	—

Tabel 2.12 menunjukkan hubungan antara komposisi kimia dan kekuatan patah melar dari baja tahan panas ferit yang lain.

1.8.2 Baja tahan panas austenit

(1) Baja tahan karat austenit

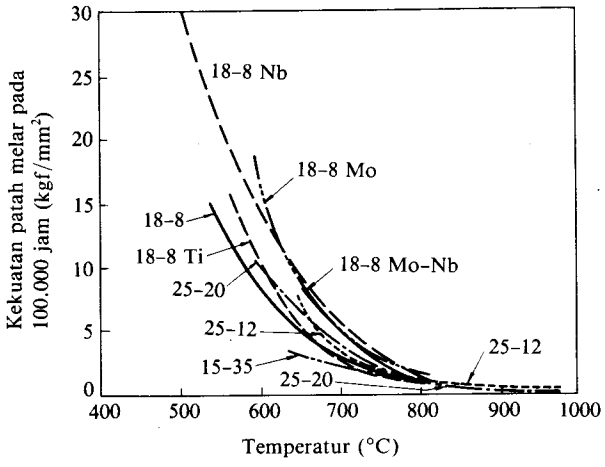
Ada baja tahan karat 18-8, yang diperkuat oleh penambahan Ti, Nb, Mo, dsb, dan yang mempunyai ketahanan panas lebih tinggi dengan menambahkan lebih banyak Cr dan Ni. Gb. 2.35 menunjukkan kekuatan patah melar dari baja ini pada 10^5 jam.

(2) Baja cor tahan panas

Baja tahan panas harus mempunyai kekuatan tinggi pada temperatur tinggi, yang mengakibatkan pengerjaan panas lebih sukar, sehingga kebanyakan dari baja ini biasanya dicor. Baja Ni-Cr mengandung sampai 20%Ni dan baja paduan tinggi Ni-Cr kedua-duanya mempunyai ketahanan oksidasi sampai 1150°C, baja yang pertama mempunyai kekuatan pemelaran dan perpanjangan yang tinggi, sedangkan baja yang terakhir kuat terhadap kejutan termal dan pemanasan berulang demikian juga pendinginan berulang.

(3) Paduan super berkadar dasar besi

Paduan Ni-Cr-Fe dan Ni-Co-Cr-Fe dapat dipergunakan pada kekuatan tinggi



Gb. 2.35 Hubungan antara kekuatan patah melar pada 10^5 jam dengan temperatur dari baja tahan karat austenit.

Tabel 2.13 Contoh komponen kimia dan kekuatan patah melar paduan super komponen dasar besi.

Jenis		Paduan	Komposisi kimia utama (%)	Kekuatan patah melar (kgf/mm²)					
				649°C		732°C		816°C	
				100 jam	1000jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam
Ni-Cr-Fe	Pengerasan regangan	19-9DL	0,3C-9Ni-19Cr-1,3Mo-1,2W-0,4Nb-0,3Ti-Fe	30,8	25,9	15,8	11,9	9,1	6,0
	Pengerasan persipitasi γ'	A286	0,05C-26,0Ni-15,0Cr-1,25Mo-2,15Ti-0,2Al-0,3V-0,003B-Fe	42,9	32,3	24,6	14,8	9,1	5,6
		Incoloy 212	0,05C-42,5Ni-13,5Cr-6,2Mo-2,5Ti-0,25Al-Fe	70,0	61,6	44,1	29,8	—	—
Ni-Cr-Co-Fe	Pengerasan presipitasi karbida	S590	0,40C-20,0Ni-20,5Cr-20,0Co-4,0Mo-4,0W-4,0Nb-Fe	35,2	26,7	22,5	17,6	15,5	11,2
	Pengerasan presipitasi γ'	Refractaloy 26	0,03C-38,0Ni-18,0Cr-20,0Co-3,2Mo-2,6Ti-0,2Al-Fe	56,3	44,3	35,9	26,7	19,0	12,7
	Pengerasan presipitasi γ''	Incoloy 903	0,03C-38,0Ni-15,0Co-3,0Nb-1,4Ti-0,7Al-Fe	68,9	65,4	42,2	36,7	10,5	6,8

sampai kira-kira temperatur 750°C–800°C. Tabel 2.13 menunjukkan komposisi kimia dan kekuatan pemelaran dari paduan utama. Dalam Tabel tersebut, pada baja tipe pengerasan regangan berarti bahwa matriks austenit diperkuat dengan menambahkan unsur pembentuk karbid, seperti Mo, W, Nb, Ti, dsb. Karena kekuatan yang cukup tidak dapat dicapai dengan hanya perlakuan panas, maka dilakukan 20–30% pengerjaan panas dan pengerjaan dingin pada 600–700°C dan dilunakkan untuk menghilangkan tegangan pada 650–730°C. Kalau baja ini harus dipergunakan pada 700°C atau lebih, sebaiknya dilakukan perlakuan penuaan pada 700–800°C setelah perlakuan pelarutan pada 1100–1250°C dan diikutii pendinginan tiba-tiba.

Paduan pengerasan presipitasi yang mengandung Ti dan Al mempergunakan fasa $Ni_3(Ti, Al)$ (fasa γ') atau fasa Ni_3Ti (fasa η) dari pengerasan presipitasi. Fasa-fasa ini adalah struktur teratur yang mempunyai kekuatan mulur lebih tinggi pada temperatur lebih tinggi. Kedua-duanya setelah perlakuan pelarutan pada 980–1150°C diberikan perlakuan penuaan pada kira-kira 730°C untuk memberikan kesempatan kepada fasa-fasa tersebut di atas berpresipitasi. Paduan yang mengandung Co memperkuat matriks austenitnya dengan Co. Di samping itu ada tiga macam paduan yaitu tipe pengerasan presipitasi dengan karbida, tipe pengerasan presipitasi dengan fasa γ' dan tipe pengerasan presipitasi dengan fasa Ni_3Nb.

(4) Paduan super berkadar dasar Ni

Pengembangan paduan super berkadar dasar Ni dengan kekuatan yang tinggi pada temperatur tinggi 900–1000°C sangat mengagumkan, satu bahan baru dikembangkan setelah bahan lainnya dst. Tabel 2.14 menunjukkan beberapa dari paduan ini dengan komposisi kimia dan kekuatan patah melar. Seperti telah diketahui dari tabel ada dua macam paduan, yang diperkuat larutan padat dan yang diperkuat oleh pengerasan presipitasi yang dipaksakan. Pada macam yang terakhir Al dan Ti ditambahkan kepada paduan NiCr dan dengan presipitasi fasa γ' (Ni_3Al) diperoleh kekuatan pada temperatur tinggi. Selanjutnya ada juga yang diperkuat dengan penambahan Mo, Co dan juga yang batas butirnya diperkuat dengan penambahan sedikit B dan Zr, dsb, sekarang bahan ini dapat diperoleh.

Paduan super berkadar dasar Ni untuk coran telah juga dikembangkan secara luas, dan NASA-VI-A adalah paduan yang mempunyai kekuatan patah melar yang tinggi, yaitu 14,7 kgf/mm² pada 920°C untuk 1000 jam. Teknik pengecoran presisi telah dikembangkan sehingga produk-produk coran sangat dapat dipercaya, karena

Tabel 2.14 Contoh komponen kimia dan kekuatan patah melar paduan super komponen dasar Ni.

Jenis	Paduan	Komponen kimia utama (%)	Kekuatan patah melar (kgf/mm²)											
			649°C		732°C		816°C		871°C		982°C		1193°C	
			100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam
Diperkuat dengan larutan padat	Hastelloy B	0,05-1,0Cr-2,5Co-28,0Mo-5,0-Fe-0,30V-Ni	35,2	25,7	24,5	17,9	11,2	6,6	—	—	—	—	—	—
	Inconell 600	0,08C-15,5Cr-8,0Fe-Ni	—	—	9,8	6,9	5,6	3,9	3,7	2,5	2,0	1,3	1,0	0,6
Diperkuat dengan presipitasi paksa	Nimonic 80A	0,05C-20,0Cr-2,0Co-2,30Ti-1,20Al-5,0Fe-Ni	62,7	50,2	38,9	27,3	19,6	11,8	—	—	—	—	—	—
	Waspaloy	0,10C-19,5Cr-13,5Co-4,25Mo-3,0Ti-1,3Al-0,005B-0,085Zr-2,0Fe-Ni	75,9	61,9	—	—	28,1	17,9	17,6	11,3	4,8	—	—	—
	Mar M 200*	0,15C-9,0Cr-10,0Co-12,5W-1,0Nb-2,0Ti-5,0Al-0,015B-0,05Zr-Ni	—	—	—	—	53,4	42,2	40,6	29,4	19,0	13,4	7,7	4,6

*Paduan coran

dengan penempaan seperti telah dikemukakan bahwa daerah penempaan panas sangat sempit dan sangat sukar untuk dipakai. Dengan mempergunakan teknik pengecoran yang ada secara praktis telah dibuat pembekuan yang tidak mengarah dan kristal tunggal untuk sudu-sudu turbin.

(5) Paduan Super Berkadar Dasar Co

Tabel 2.15 menunjukkan contoh paduan super yang mempunyai matriks cobalt. Paduan yang utama adalah Co-Ni-Cr. Paduan vitalium (HS 21) menarik perhatian yang pertama ketika mesin jet dibuat dan dipergunakan sebagai bahan untuk sudu-sudu yang berputar dari turbin dan untuk nozel.

Tabel 2.15 Komponen kimia utama dan kekuatan patah melar paduan super komponen dasar Co.

Paduan	Komponen kimia utama (%)	Kekuatan patah melar (kgf/mm²)									
		649°C		732°C		816°C		871°C		982°C	
		100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam	100 jam	1000 jam
S816	0,38C-1,20Mn-20,0Ni-20,0Cr-4,0Mo-4,0W-4,0Nb-4,0Fe-Co	42,2	32,3	28,1	21,1	17,6	12,7	10,9	7,0	3,9	2,1
Vitallium* (HS 12)	0,25C-3,0Ni-27,0Cr-5,0Mo-1,0Fe-Co	36,6	29,5	22,5	15,5	17,5	12,3	13,4	9,3	6,6	4,9

*Paduan coran

2 | BESI COR ✓

Besi cor adalah satu bahan yang sangat penting yang dipergunakan sebagai bahan coran lebih dari 80%. Daerah komposisi kimia ditetapkan dalam diagram keseimbangan Fe-C pada batas kelarutan karbon pada besi γ, yaitu mengandung 2% karbon atau lebih, tetapi besi cor yang nyata terdiri dari paduan yang berkomponen banyak yang mengandung Si, Mn, P, S dan unsur-unsur lainnya. Tabel 2.16 memberikan ikhtisar sifat-sifat mekanis dari besi cor.

Tabel 2.16 Contoh komposisi kimia tipikal dan sifat-sifat mekanik besi cor.

Jenis	Komposisi kimia (%)					(a) Karbon ekivalen rata-rata	Ketebal-an logam (mm)	Kekerasan Brinell	(b) Beban lentur. (kg)	Defleksi (mm)	Kekuatan tarik. (kgf/mm^2)	Keterangan
	Karbon total	Si	P	Lainnya								
Besi cor kelabu:												
AISI Kelas 20	3,1–3,8	2,2–2,4	0,20–0,40	0,80–0,13	S	3,98	≥25	130–180	2000–3000	2,5–3,8	12,7–18,3	Kira-kira ada
AISI Kelas 40	2,75–3,0	1,5–1,9	0,07–0,15	0,5–0,7	Mn	3,42	≥25	180–217	3800–4500	7,7–9,7	28,8–31,6	enam kelas di-
AISI Kelas 60	2,5–2,8	1,2–1,5	0,07–0,15			3,09	≥25	212–248	5200–6200	8,9–12,7	42,2–45,0	setiap standar suatu negara.
Besi cor kekuatan tinggi (A. F. Meehan)	2,9–3,3	1,1–1,7	<0,12	0,8–1,0	Mn	—	≥22	≥217	1400–1600	7–8,5	≥35,0	
Besi cor maleabel inti kelabu	2,30–2,50	0,90–1,20	<0,1	0,20–0,35	Mn	—	—	114–140	—	—	≥35,0	JIS Kelas 3
" (perlit)	"	"	"	"		—	—	201–269	—	—	≥60,0	JIS Kelas 3
Besi cor nodular 1	3,4–4,1	2,1–2,7				—	—	120–190	—	—	≥40,0	Jis Kelas 1 dinormalkan dicelup dingin dan ditemper.
" 4	—	—	—	0,04≤	Mg	—	—	230–350	—	—	≥70,0	

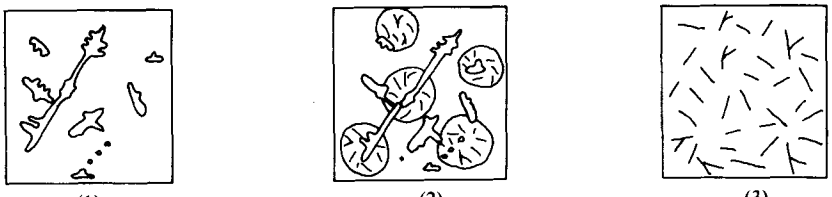
(a): Karbon ekivalen = %C + 0,3 (%Si + %P)
(b): Pengujian lentur: Diameter 30,0 dan bentangan 450 mm, defleksi, diukur di tengah bentangan.

2.1 Struktur besi cor

2.1.1 Pembekuan besi cor

Seperti telah diketahui dari diagram keseimbangan Fe-C, kalau besi cor cair dari hipoeutektik atau hipereutektik didinginkan, akan membeku menjadi kristal berupa austenit primer atau grafit primer setelah sampai kepada garis cair seperti ditunjukkan secara skematik dalam Gb. 2.36. Setelah sampai temperatur eutektik, fasa berupa grafit-austenit menginti dan tumbuh di sekitar kristal primer. Pada saat ini grafit tumbuh ke segala arah dengan menyentuh cairan. Dan membentuk cabang-cabang sesuai dengan laju pertumbuhannya, dan sebagai akibatnya akan terbentuk kumpulan eutektik yang hampir menyerupai bentuk bola. Ini dinamakan sel eutektik. Dalam batas sel eutektik ini berkumpul cairan yang mempunyai titik cairan rendah yang mengandung unsur-unsur lain yang kemudian beku, jadi selanjutnya pembekuan berakhir. Sehingga struktur dari besi cor terdiri dari grafit yang berbentuk serpih-serpih berada pada matrik besi.

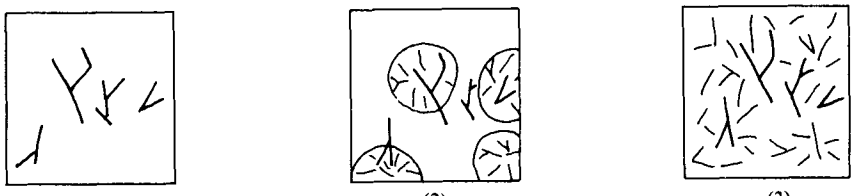
Pada umumnya patahan besi cor mempunyai warna kelabu yang disebabkan oleh



(1) (2) (3)

(a) Besi cor hipoeutektik

(1) Pengristalan kristal primer γ dalam fasa cari
(2) Petrumbuhan γ dan grafit sel eutektik
(3) Penyebaran grafit serpih dalam fasa γ



(1) (2) (3)

(b) Besi cor hipereutektik

(1) Pengristalan kristal primer grafit dalam fasa cair
(2) Pertumbuhan γ dan grafit sel eutektik
(3) Penyebaran grafit serpih dalam fasa dasar γ

Gb. 2.36 Pembekuan struktur besi cor kelabu. (H. Morrogh: J. Iron Steel Inst. *206* (1968), 1)

grafit yang terjadi pada waktu pembekuan, jadi besi cor demikian dinamakan besi cor kelabu. Kalau laju pendinginan pada pembekuan tinggi, Fe_3C-austenit dari eutektoid mengkristal yang menunjukkan patahan berwarna putih, oleh karena itu besi cor ini dinamakan besi cor putih.

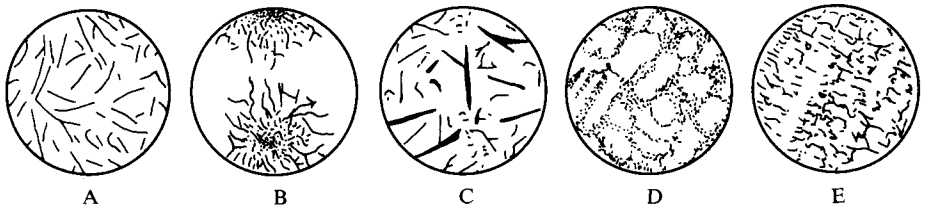
Dalam besi cor apakah terbentuk grafit atau terbentuk sementit tergantung pada laju pendinginan tetapi juga sangat dipengaruhi oleh komposisi kimia. Pada umumnya unsur-unsur bertanggung jawab terhadap percepatan penggrafitan pada waktu pembakuan besi cor dan unsur-unsur yang bertanggung jawab keadaan sebaliknya disebut dalam urutan menurut kemampuannya sebagai berikut:

Unsur-unsur yang mempercepat penggrafitan:
Si, Ti, Ni, Al, Co Au, Pt

Unsur-unsur yang menghambat penggrafitan:
Cr, Te, S, V, Mn, Mo, P, W, Mg, B, O, H, N

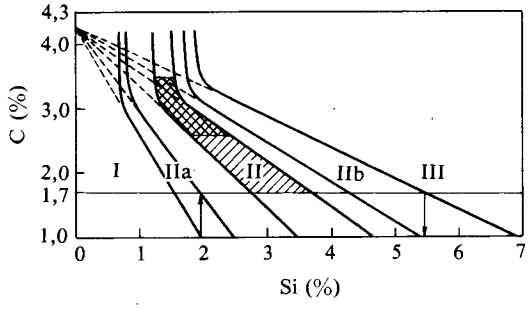
2.1.2 Struktur besi cor

Gb. 2.37 menunjukkan distribusi dari serpih grafit dalam besi cor menurut klasifikasi American Castings Association. A adalah struktur yang paling disenangi karena besi cor ini menunjukkan serpih grafit yang mempunyai panjang medium terdistribusikan sebarang. B biasanya terdapat di sekitar permukaan coran di mana laju pendinginan agak cepat, di sini pusat dari sel eutektik menyebabkan butir grafit yang halus karena pendinginan super dan di sekelilingnya dilanjutkan dengan serpih grafit. Struktur ini dinamakan struktur bergrafit bunga ros. Pada C grafit primer mengkristal secara kasar dalam hal hipereutektik akan memberikan sifat-sifat mekanis yang ren-



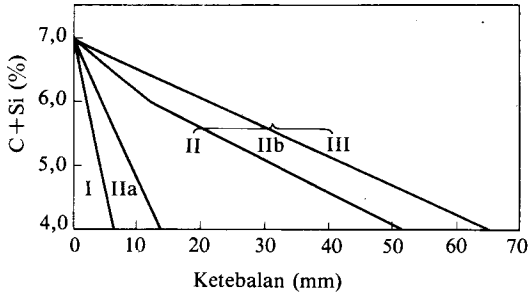
Gb. 2.37 Penyebaran grafit serpih (AFS: ASTM, *A247* (1941)).

dah. Pada D disebabkan karena pendinginan lanjut yang sangat pada waktu pembekuan semua grafit menjadi halus. Ini dinamakan grafit eutektik atau grafit panas lanjut, sehingga besi cor mempunyai kekuatan yang tinggi tetapi kurang ulet. E biasanya timbul kalau kadar karbon kurang, grafit terdistribusikan di antara austenit primer yang tumbuh besar-besar. Keuletannya sangat rendah seperti halnya B. Distribusi grafit semacam itu terutama dipengaruhi oleh adanya komponen lain selain dari pada C serta oleh laju pendinginan pada waktu pembekuan. Selanjutnya struktur matriks yaitu ferit dan perlit ada pada perbandingan yang berbeda-beda tergantung pada laju pendinginan pada waktu melalui temperatur transformasi eutektoid dan juga tergantung pada kandungan unsur lain, yang juga memberikan pengaruh kepada berbagai sifat besi cor. Gb. 2.38 adalah diagram Meurer yang menunjukkan hubungan antara C dan Si dalam presentase dan struktur besi cor pada laju pendinginan yang tetap, sedangkan Gb. 2.39 adalah diagram struktur Greiner-Klingenstein yang menunjukkan



I : Besi cor putih IIb: Besi cor lunak
IIa: Besi cor motel III: Besi cor sangat lunak
II : Besi cor perlit

Gb. 2.38 Diagram Maurer untuk besi cor (E. Maurer: Stahl u. Eisen *44* (1924), 1522).



(I–II: menurut Gb. 2.38)

Gb. 2.39 Diagram Greiner-Klingenstein untuk besi cor.
(T. Klingenstein: Giesserei-Ztg., *23* (1926), 680).

hubungan antara C dan Si dalam presentase dan berbagai ketebalan besi cor.

2.1.3 Kekuatan besi cor

Besi cor umumnya diklasifikasikan oleh kekuatan tariknya, besi cor yang mempunyai kekuatan tarik 30 kgf/mm^2 disebut besi cor konstruksi yang berkekuatan tinggi. Dalam besi cor, grafit terdistribusikan dalam matriks, yang kalau ada tegangan terjadi konsentrasi tegangan di sekitar grafit yang akan menyebabkan retak, jadi kekuatannya sangat dipengaruhi oleh jumlah, bentuk dan distribusi grafit. Jumlah grafit ditentukan oleh komposisi kimia sebagai berikut:

Jumlah karbon eutektik=4,26−0,31(%Si)−0,33(%P)+0,27(%Mn)

Jumlah karbon sebenarnya dibagi dengan karbon eutektik ini menyatakan sejauh mana komposisi kimia besi cor menyimpang dari pada komposisi komponen eutektik, ini yang disebut derajat eutektik S_c. Yang disederhanakan untuk bisa dipergunakan sbb:

$$S_c = \%C / \left\{4{,}3 - 1/3(\%Si + \%P)\right\}$$

Kalau S_c menjadi besar jumlah grafit meningkat dan sifat-sifat mekaniknya menjadi buruk. Hubungan itu adalah,

Kekuatan tarik, $\sigma_B = 100\text{–}80S_c$ (kgf/mm^2) (untuk batang buat 30 mm)

Kererasan Brinell, $H_B = 530 - 344S_c$ (kgf/mm^2) (untuk batang bulat 30 mm)

$$H_B = 100 + 4{,}3\sigma_B$$

yang sering dipakai sebagai hubungan standar. Apabila perbandingan antara kekuatan tarik yang diukur dan kekuatan standar disebut kekuatan relatif, dan kalau harga ini lebih besar dari 1 maka bahan tersebut mempunyai kualitas tinggi. Dengan cara yang sama, perbandingan antara kekerasan yang diukur dan kekerasan standar di atas dinamakan kekerasan relatif. Bahan yang mempunyai harga kurang dari 1 mudah dikerjakan dengan mesin, dan kalau lebih besar dari 1 umumnya bahan tersebut mempunyai sifat-sifat metalurgi yang kurang baik.

2.4.1 Besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi

Untuk mendapat besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi dengan kekuatan tarik di atas 30 kgf/mm^2, harga S_c harus lebih kecil. Besi cor dengan S_c yang kecil mempunyai kecairan yang jelek dan mudah membentuk rongga-rongga, tegangan sisa, melenting, dan cacat-cacat lainnya atau mudah menjadi besi cor putih. Setelah diadakan studi yang lama mengenai hal ini untuk besi cor yang mempunyai kekuatan tarik tinggi, maka sekarang secara luas dipergunakan cara dengan menambahkan kepada cairan besi yang mempunyai S_c yang rendah sedikit kalsium silikon atau ferro silikon beberapa saat sebelum penuangan, yaitu untuk mencegah terjadinya besi cor putih, dengan demikian maka grafit yang halus terdistribusikan secara merata pada matriks perlit. Proses penambahan paduan tersebut dinamakan inokulasi, yang secara besar-besaran telah menghasilkan besi cor meehanit.

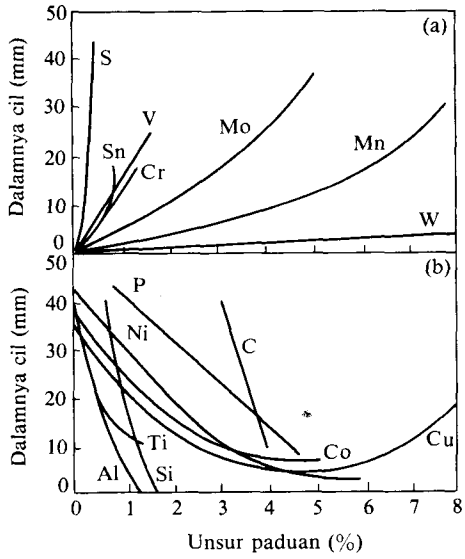
2.2 Coran cil

Besi cor cair yang mempunyai komposisi kimia yang cocok dituangkan dalam sebuah cetakan logam atau cetakan sebagian dari logam, bagian yang mengenai cetakan logam tersebut terdinginkan secara cepat menjadi besi cor putih yang sangat keras, sedangkan bagian lainnya menjadi besi cor kelabu yang memberikan keuletan

lebih baik. Pengecoran ini dinamakan pengecoran cil.

2.2.1 Pengaruh unsur-unsur paduan pada dalamnya cil

Tebalnya suatu bagian yang menjadi besi cor putih dinamakan dalamnya cil. Dalamnya cil ditentukan oleh ukuran cetakan logam dan komposisi besi cor. Gb. 2.40 menunjukkan pengaruh unsur-unsur paduan pada dalamnya cil.



(a) Unsur-unsur yang memberikan coran putih.

(b) Unsur-unsur penggrafit

Gb. 2.40 Pengaruh unsur paduan pada dalamnya cil. (K..Igawa: Japan Soc. Metals, Handbook of Metals, the III edition (1971), 1952, (Maruzen)).

2.2.2 Perlakuan panas besi cor cil

Coran cil mempunyai perbedaan laju pendinginan di setiap tempat dan mempunyai perbedaan struktur mikro, yang menyebabkan tegangan-tegangan sisa yang bisa menyebabkan deformasi dan keretakan, jadi tegangan sisa ini perlu dihilangkan dan perlu pemanasan untuk memperbaiki struktur mikronya. Sebaiknya diadakan perlakuan panas supaya sementit yang tumbuh secara kasar pada lapisan cil pada coran larut menjadi fasa γ, dan kemudian membentuk presipitat yang sedapat mungkin berbentuk bola, dalam hal ini penggrafitan dicegah. Dengan pengaturan struktur mikro secara tersebut di atas, maka kekuatan tariknya diperbaiki lebih dari 40% dan harga impactnya diperbaiki sampai 30–50%. Sebagai contoh perlakuan panas dengan memanaskan sampai 820°C untuk 20 jam pada 850°C untuk 9 jam, pada 870°C untuk 7 jam, laju pendinginan 10°C per jam sampai 650°C secara perlahan-lahan dan kemudian didinginkan di udara.

2.2.3 Penggunaan coran cil

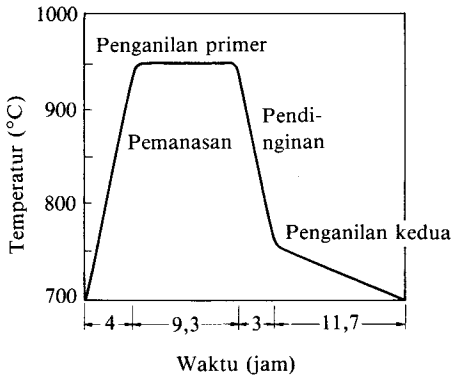
Coran cil yang mempunyai sifat keras pada permukaannya dan secara keseluruhannya masih ulet banyak dipergunakan untuk roda-roda dan rol-rol, rol penghancur, rol untuk pengerolan logam, rol untuk kertas, perkakas pertanian, pompa pasir, dsb.

2.3 Besi cor maleabel

Grafit yang berbentuk daun pada besi cor tidak menguntungkan ditinjau dari segi kekuatan. Untuk memperbaiki keuletannya bentuk tersebut dirubah menjadi bentuk bongkahan. Besi cor yang mempunyai bentuk grafit tersebut dinamakan besi cor maleabel. Besi cor yang dibuat dengan dekarburisasi, mempunyai warna patahannya putih dinamakan besi cor maleabel perapian putih, sedangkan besi cor yang dibuat dari besi cor putih dianil untuk mengubah Fe_3C menjadi grafit dan Fe, mempunyai patahan yang warnanya hitam dinamakan besi cor maleabel perapian hitam.

Besi cor maleabel perapian putih terdekarburisasikan dari permukaan, hal itu membatasi ketebalan coran sampai kira-kira 9–15 mm.

Besi cor maleabel perapian hitam bisa dibuat lebih tebal dengan mengatur komposisinya dan waktu anilnya. Dalam daerah prosentase 2,2–3,0%C dan 0,8–1,3%Si, prosentase yang terendah dipergunakan untuk produk yang tebal dan prosentase yang lebih tinggi untuk produk yang kurang tebal. Gb. 2.41 menunjukkan penganilan dalam dua tahap. Tahap pertama penggrafitan sementit bebas pada 870–950°C, dan tahap kedua adalah untuk penggrafitan Fe_3C dalam perlit pada 700–760°C. Dengan demikian akan terjadi matriks ferit sebagai struktur, di mana kelompok grafit terdispersikan.



Gb. 2.41 Penganilan untuk penggrafitan dari besi cor perapian hitam.

Besi cor maleabel perlitik mempunyai matriks perlit dengan kekuatan dan ketahanan aus yang lebih baik. Besi cor ini banyak dipergunakan yang diproduksi sebagai berikut:

1) Setelah penggrafitan tahap pertama selesai, penggrafitan yang kedua tidak dilakukan dan karbon yang terikat tetap dipertahankan.
2) Setelah tahap penggrafitan yang pertama dan kedua selesai, kemudian dipanaskan pada temperatur atau di atas temperatur transformasi untuk mempresipitasikan karbon yang terikat.
3) Mempergunakan besi cor yang mengandung 0,6% atau lebih dari Mn atau 0,5% atau kurang dari Mo dan Cr, yang dimaksudkan untuk menahan perlit walaupun ini terjadi pada penggrafitan standar.

2.4 Besi cor nodular

Kalau Mg atau Ce ditambahkan kepada cairan besi cor, maka grafit pada coran menjadi berbentuk bulatan. Dibandingkan dengan grafit yang mempunyai bentuk ser-

pih seperti daun, grafit yang berbentuk bulat atau nodular mempunyai derajat konsentrasi tegangan yang sangat kecil, maka kekuatan besi cor menjadi lebih baik. Unsur-unsur lain yang dapat membulatkan grafit yaitu Ca, Na, K, Li, Ba, Sr, Zn, dsb, telah dikenal, tetapi didasarkan atas masalah harga maka dipilih unsur Mg yang paling menguntungkan.

Besi cor macam ini umumnya dinamakan besi cor liat (di Jepang dan di Amerika Serikat), sedangkan di Inggris dinamakan besi cor nodular. Besi cor nodular mempunyai keuletan yang baik dan mempunyai ketahanan korosi dan ketahanan panas yang baik pula, oleh karena itu dipakai untuk berbagai macam keperluan, untuk pipa-pipa, rol penggiling, cetakan, komponen mekanik, komponen-komponen untuk tungku dan untuk konstruksi teknik sipil.

2.4.1 Pencairan besi cor nodular

Komposisi besi cor cair $S_c > 1$, yaitu komponen hipereutektik dipergunakan karena mempunyai mampu cor yang baik dan penggrafitan bulat yang sangat mudah. Unsur oksigen dan belerang mempunyai afinitas yang sangat kuat dengan Mg, oleh karena itu untuk menekan penggunaan Mg sekecil mungkin maka perlu diadakan deoksidasi dan desulfurisasi sebelumnya di dalam tungku atau di luar tungku. Unsur-unsur lain yang menahan penggrafitan bulat ditunjukkan pada Tabel 2.17. Adalah perlu mempergunakan bahan yang mengandung unsur-unsur tersebut sekecil mungkin. Komponen-komponen yang utama adalah 3,4–4,0%C, 1,5–2,0%Si, Mn tidak lebih 0,4–0,7%, 0,1–0,2%P, dan 0,035–0,040%S. Mg dapat menyebabkan ledakan, oleh karena itu Mg ditambahkan dalam bentuk paduan dan ditunjukkan dalam Tabel 2.18. Paduan Mg sangat ringan, oleh karena itu harus didorong untuk bisa masuk ke dalam cairan besi, maka dipakai bermacam cara untuk melakukan hal tersebut. Besi cair yang diproses dengan magnesium sangat terdinginkan lanjut, pada pembekuan mudah terbentuk besi cor putih, oleh karena itu setelah penambahan Mg, perlu diinokulasi oleh 0,40–0,6%Si dengan Fe-Si.

Tabel 2.17 Toleransi unsur inhibitor pada penggrafitan bulat.

Unsur inhibitor	Toleransi (%)	Unsur inhibitor	Toleransi (%)
Al	0,15	Te	0,002
Sb	0,01	Sn	0,10
As	0,20	Ti	0,15
Bi	0,001	Cu	2,0
Se	0,03	Pb	0,002

Tabel 2.18 Komposisi paduan untuk penambahan Mg (%).

Mg	Ni	Si	Cu	C	Fe
15–20	75–80	—	—	2	Sisa
15–20	40–50	25–30	—	—	〃
15–20	—	60–65	—	—	〃
12	—	40	16	—	〃
9	—	80	—	—	〃

2.4.2 Struktur dan sifat-sifat mekanik besi cor bergrafit bulat

Sejak berhasilnya pembulatan grafit dalam besi cor, berbagai bentuk grafit mulai diamati antara bentuk sepih dengan bentuk bulat, maka pada Kongres Pengecoran Internasional pada tahun 1962, bentuk-bentuk grafit tersebut diklasifikasikan seperti ditunjukkan dalam Gb. 2.42. Bentuk I adalah grafit serpih yang biasa, bentuk II bentuk grafit yang berujung runcing yang biasa terjadi kalau kelebihan unsur pembulat, bentuk III untuk grafit yang berujung bulat yang biasa terjadi bila unsur pembulat tidak cukup, ini disebut grafit serpih palsu grafit berbentuk cacing. Bentuk IV untuk grafit gumpalan yang biasa terjadi pada besi cor meleabel perapian hitam dan bentuk V adalah bentuk grafit nodular.

Gb. 2.42 Klasifikasi bentuk grafit oleh kongres Committee of International Foundry.

Besi cor bergrafit bulat mempunyai komposisi kimia yang mumudahkan penggrafitan, dan sifat-sifat mekaniknya terutama ditentukan oleh matriks dan perlakuan panasmya. P adalah unsur yang merusak sifat mekanik, oleh karena itu kadar fosfor dibuat maksimum 0,1% untuk penggunaan pada temperatur kamar atau 0,05% untuk penggunaan pada temperatur lebih rendah. Sifat-sifat mekaniknya yang khusus ditunjukkan pada Tabel 2.16.

2.5 Besi cor paduan

Unsur-unsur paduan ditambahkan pada besi cor untuk memperbaiki sifat-sifat mekanik dan untuk memberikan sifat-sifat khusus seperti ketahanan korosi, ketahanan panas dan kemagnitan. Sifat yang pertama umumnya didapat dengan paduan rendah sedangkan yang terakhir melibatkan beberapa unsur yang khusus.

Besi cor dengan kekuatan tinggi mempunyai kekuatan tarik yang lebih baik dengan menambahkan Ni, Cr, Mo, dsb, pada 0,5–1,5% untuk memberikan struktur grafit dan struktur perlit yang halus. Besi cor ini dipakai untuk silinder motor, rol dan sebagainya.

Besi cor yang mempunyai ketahanan terhadap asam dipadu dengan 10% atau lebih Si untuk mendapatkan ketahanan korosi, besi cor Nikel tinggi, besi cor Cr tinggi, dsb. Agar besi cor tahan panas, berbagai besi cor paduan dipadu dengan Cr, Mo, Si, Al, Ni, dsb. Selanjutnya besi cor yang tidak magnetik dipadu dengan 5–15% Ni dan 9%Mn.

3 TEMBAGA DAN PADUANNYA

3.1 Tembaga murni

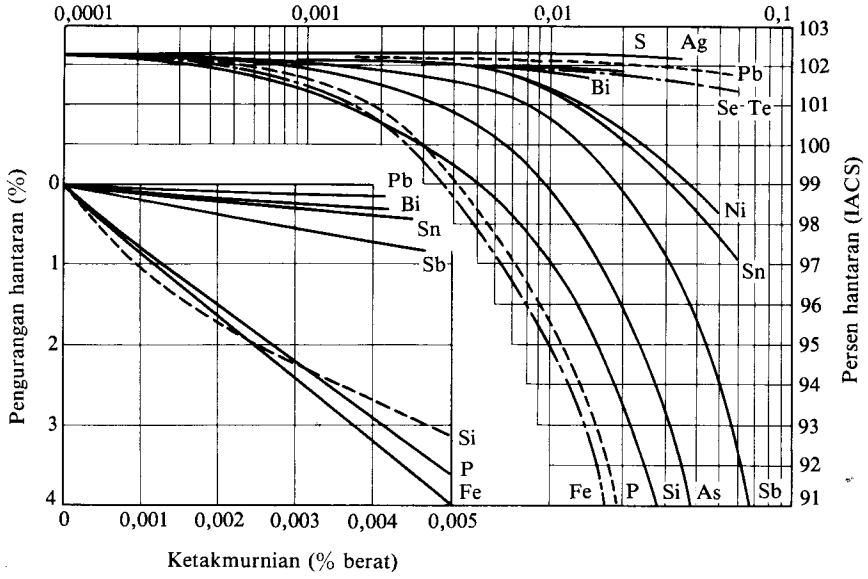
Secara industri sebagian besar penggunaan tembaga dipakai sebagai kawat atau bahan untuk penukar panas dalam memanfaatkan hantaran listrik dan panasnya yang baik. Sejak tahun 1913 sebagai satuan hantaran listrik dipergunakan % IACS (Internasional Annealed Copper Standard) yang mempunyai nilai rata-rata 100% untuk tembaga teknis. Dalam standar ini suatu hantaran dinyatakan 100% kalau tahanan spesifik pada 20°C adalah 1,7241 $\mu\Omega$cm atau 0,153280 Ω/g.m (pada masa jenis 8,89 g/cm^3). Sesuai dengan perkembangan dalam teknologi pemurnian, kemurnian tembaga telah sangat diperbaiki dan sekarang tembaga yang paling murni mempunyai konduktifitas listrik 103%. Hantaran panas pada 20°C telah juga diperbaiki dari 0,923 cal/(cm. derajat. detik) dalam tahun 1950-an sampai 0,941 cal/(cm. derajat. detik) dalam tahun 1970-an.

Gb. 2.43 menunjukkan perubahan % IACS oleh konsentrasi, ketakmurnian, (a) untuk kasus yang mengandung oksigen rendah dan (b) untuk yang mengandung 0,03% Oksigen. Pengaruh unsur paduan pada hantaran listrik umumnya banyak dipengaruhi oleh unsur-unsur yang membentuk larutan padat; yang memberikan pengaruh lebih kecil kalau terjadi presipitasi. Dengan adanya oksigen perbandingan pengurangan dari P, As, dsb, menurun, hal ini disebabkan larutan padat jumlahnya menurun oleh adanya formasi oksida.

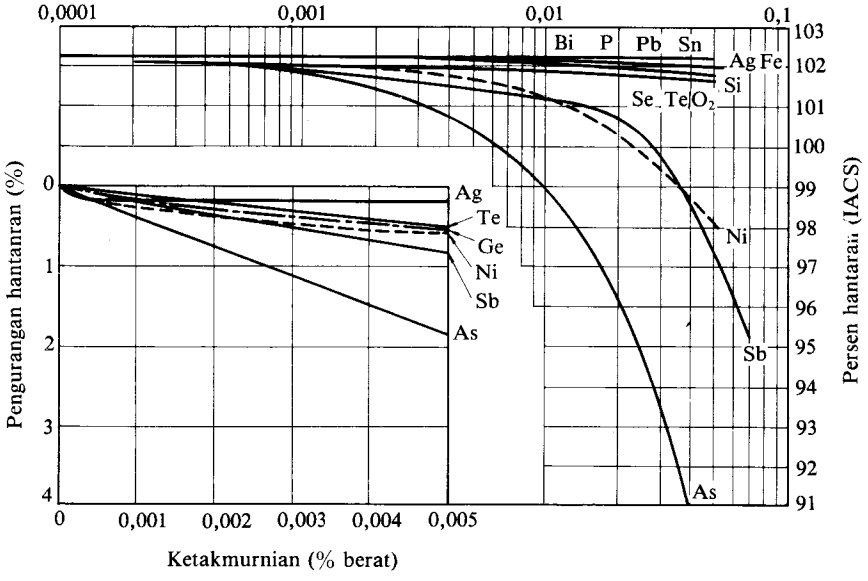
Tembaga murni untuk keperluan industri dicairkan dari tembaga yang diproses dengan elektrolisa, dan diklasifikasikan menjadi tiga macam menurut kadar oksigen dan cara deoksidasi, yaitu tembaga ulet, tembaga deoksidasi, dan tembaga bebas oksigen. Kalau O terkandung dalam tembaga unsur-unsur pengotor dapat mengendap sebagai oksida maka jumlah larutan padat untuk menaikan hantaran listrik, menjadi kurang. Dengan oksida yang banyak pada temperatur tinggi dapat menyebabkan kegetasan hidrogen, untuk mencegah ini dipergunakan tembaga deoksidasi atau tembaga bebas oksigen. Dalam tembaga murni untuk keperluan industri biasa terdapat unsur-unsur gas yang memberikan pengaruh terhadap berbagai sifat. Oksigen adalah unsur yanng penting yang berhubungan erat dengan kadar hidrogen dan belerang.

3.1.1 Pengaruh oksigen

Gb. 2.44 menunjukkan diagram fasa untuk sistim Cu–O jumlah larutan padat maksimum dari O pada titik eutektik 1065°C, adalah 1,008%. Tembaga ulet mengandung sampai 0,04%O terdiri dari struktur berfasa ganda dengan Cu dan Cu_2O. Dalam coran, struktur eutektik dari Cu–Cu_2O dapat dilihat, tetapi dengan pengerjaan berubah menjadi struktur di mana partikel-partikel Cu_2O mengarah dalam arah pengerjaan. Cu_2O merupakan fasa berbentuk piringan diharapkan memberikan pengaruh yang kurang buruk terhadap sifat-sifat mekanik, tetapi kalau jumlahnya banyak akan menyukarkan dalam pengerjaan dingin, jadi lebih baik mengontrol



(a) Tembaga bebas oksigen



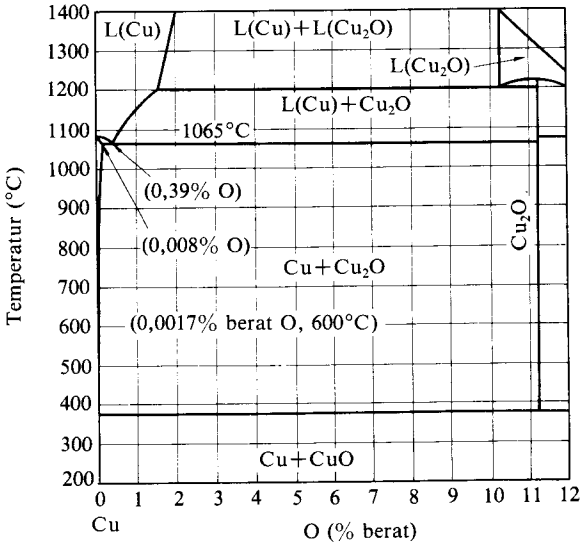
(b) 0,03% O tembaga ulet

Gb. 2.43 Hubungan antara laju pengurangan dan ketakmurnian dalam hantaran listrik.

kadar oksigen agar rendah walaupun untuk tembaga ulet.

3.1.2 Pengaruh hidrogen

Tembaga cair mengabsorb hidrogen bersama-sama oksigen. Banyak H_2 yang terkandung membentuk gas pada waktu pendinginan. Kalau pencairan tembaga dilakukan pada atmosfir yang lembab terjadi desosiasi H_2O pada permukaan tembaga cair. Jumlah hidrogen yang larut di dalam tembaga cair sebanding lurus dengan akar 2



Gb. 2.44 Diagram fasa Cu-O.

dari konsentrasi hidrogen, dan hidrogen masuk ke dalam tembaga dalam keadaan atom. Dalam keadaan padat kelarutan hidrogen menurun banyak, tetapi hidrogen dengan jumlah besar yang cukup dapat terlarut dalam keadaan padat di antara kisi atom. Menurut pengukuran yang sebenarnya dalam keadaan padat terkandung H sebanyak 1/2-1/3 dari O.

H dalam tembaga yang mengandung O bereaksi dengan Cu_2O membentuk H_2O, yang tidak bisa lagi tinggal di dalam kisi atom dan membentuk gelembung-gelembung yang mengakibatkan berbagai cacat dalam batas butir. Jadi tembaga liat mengandung jumlah O yang cukup menjadi getas karena pemanasan dalam atmosfir tereduksi, hal ini sering dinamakan penyakit hidrogen. Untuk keadaan tersebut tidak dapat dipergunakan tembaga ulet kecuali tembaga deoksidasi, tembaga bebas hidrogen atau tembaga deoksidasi fosfor.

3.1.3 Tembaga deoksidasi

P sering dipergunakan untuk deoksidasi Cu. Karena kegetasan yang disebabkan hidrogen merupakan kerugian, maka tembaga deoksidasi fosfor dipergunakan untuk pengelasan dan penyolderan. Jumlah P tersisa adalah 0,004-0,040% yang mengurangi konduktifitas listrik. Sebagai tambahan CaB_6 dan Li dipergunakan juga untuk deoksidasi. Karena Li adalah efektif untuk deoksidasi dan untuk dehidrogenisasi tanpa menyebabkan penurunan hantaran listrik, maka dengan maksud yang sama dapat dipergunakan juga bagi tembaga bebas oksigen.

Di Amerika Serikat tembaga oksigen dibuat dari tembaga elektrolitik yang sangat murni dengan mempergunakan tungku induksi frekwensi rendah, dalam atmosfir gas CO dengan pengecoran kontinu, hasilnya dinamakan tembaga hantaran tinggi bebas oksigen (tembaga OFHC). Di Jerman tembaga dibuat sampai 0,013%O yang dihilangkan gasnya dengan Li dan dituang dalam atmosfir CO didapat tembaga bebas oksigen. Di Jepang tembaga dibuat dengan mencairkannya dalam vakum atau dalam gasCO. Dengan demikian O menjadi lebih rendah dari 0,001%, kadar H lebih rendah, tidak terjadi penggetasan hidrogen. Tembaga tersebut dipergunakan untuk katoda tabung sinar X dan magnetron.

3.2 Paduan tembaga

Tembaga membentuk larutan padat dengan unsur-unsur logam lain dalam daerah yang luas, dan dipergunakan untuk berbagai keperluan. Tabel 2.19 menunjukkan contoh dari paduan tembaga utama untuk proses pembentukan.

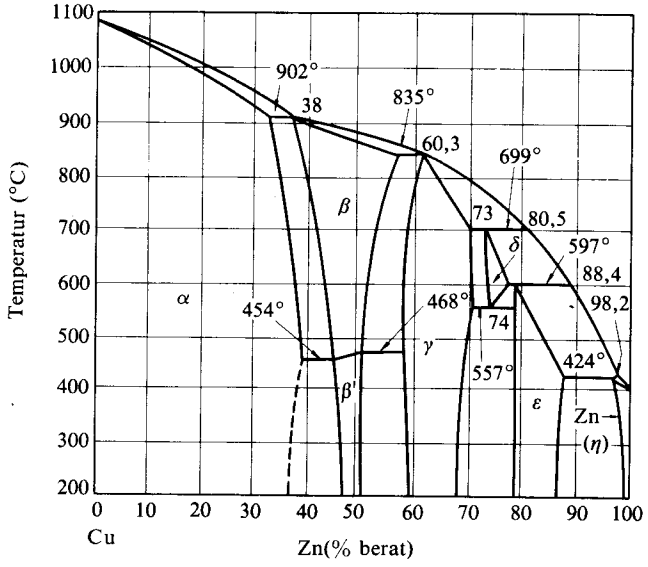
Paduan untuk coran hampir mempunyai komposisi kimia yang sama tetapi untuk memperbaiki mampu cornya dan mampu mesinnya komposisi kimianya agak berbeda dalam beberapa komponen.

3.2.1 Kuningan

Kuningan berasal dari zaman Romawi, Gb. 2.45 menunjukkan diagram fasa Cu-Zn. Dalam sistem ini terdapat 6 fasa yaitu α, β, γ, δ, ε dan η, dari semua fasa itu yang penting secara industri adalah dua yaitu α dan β. α mempunyai struktur *fcc* dan β mempunyai struktur *bcc*. Ada juga fasa β' dengan kisi super. Seperti telah diketahui

Tabel 2.19 Paduan tembaga utama tempaan.

Paduan	Komposisi kimia utama (%)	Sifat-sifat mekanik setelah penganilan			Penggunaan
		Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Kekuatan mulur (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	
Kuningan 70-30	70Cu-30Zn	32,6	11,5	60	Emas tiruan, penarikan dalam
Kuningan 60-40	60Cu-40Zn	37,8	12,0	45	Pemrosesan logam tipis
Kuningan pemotongan bebas.	61,5Cu-35,5Zn-3,0Pb	34,3	12,6	53	Sekrup, baud
Kuningan admiralty	71,0Cu-28,0Zn-1,0Sn	32,5	9,4	65	Kondensor, kuningan kapal dengan seng tinggi untuk komponen kapal.
Brons fosfor	94,8Cu-5,0Sn-0,25P	35,0	14,0	58	Roda gigi, pegas
Brons Mangan	58,5Cu-39,2Zn-1,0Sn-1,0Fe-0,3Mn	45,5	21,0	35	Poros baling-baling kapal
Brons Aluminium	95,0Cu-5,0Al	38,6	15,4	65	Untuk industri kimia, bahan tahan korosi.
Perak German	65,0Cu-17,0Zn-18,0Ni	40,7	17,5	40	Untuk penarikan dalam, perhiasan, pengukur
Cupronickel	70,0Cu-30,0Ni	40,0	17,5	45	Tembaga putih, pipa tahan korosi
Brons Berilium	98,0Cu-2,0Be	48,5	24,6	35	Paduan penuaan, pegas



Gb. 2.45 Diagram fasa Cu-Zn.

dari diagram fasa unutk kuningan 70–30, fasa α merupakan fasa yang lunak dan mudah dikerjakan, sedangkan kuningan 60–40, adalah fasa $\alpha+\beta$ yang mempunyai kekuatan tinggi, dan banyak paduan dari ini yang mempunyai kekuatan tarik yang tinggi. Paduan dengan kira-kira 45%Zn mempunyai kekuatan yang paling tinggi akan tetapi tidak dapat dikerjakan, jadi hanya dipergunakan untuk paduan coran.

(1) Kuningan khusus

Kuningan yang dicampur unsur ketiga untuk memperbaiki ketahanan korosi, ketahanan aus, mampu mesin, dsb, disebut kuningan khusus. Unsur-unsur yang dipadukan terutama Mn, Sn, Fe, Al, Ni, Pb, dsb. Unsur-unsur ini larut padat dalam α dan β, sehingga tidak membentuk fasa baru hanya mengubah perbandingan antara fasa α dan β.

Pb larut padat dalam kuningan hanya sampai 0,4%, dan kelebihannya mengendap dalam batas butir dan di dalam butir terdispersikan secara halus yang hal ini memperbaiki mampu mesin dan membuat permukaan yang halus oleh karena itu dipergunakan untuk roda gigi pada jam yang dibebani secara ringan.

Sn memperbaiki ketahanan korosi dan sifat-sifat mekaniknya kalau ditambahkan dalam daerah larutan padat.

Al adalah efektif untuk memperhalus butir kristal dan memperbaiki ketahanan korosi terhadap air laut jadi paduan ditambah 1,5 sampai 2,5%Al dapat dipergunakan untuk pipa kondensor dsb.

(2) Kuningan berkekuatan tarik yang tinggi

Kuningan yang berkekuatan tarik yang tinggi dibuat dari kuningan 60–40 dengan paduan 5%Mn, 2%Fe dan 2%Al, tidak melebihi jumlah 3–5%. Ni memberikan pengaruh sama dan memperbaiki sifat-sifatnya sesuai dengan jumlah yang ditambahkan, yang bisa ditambahkan sampai 10%.

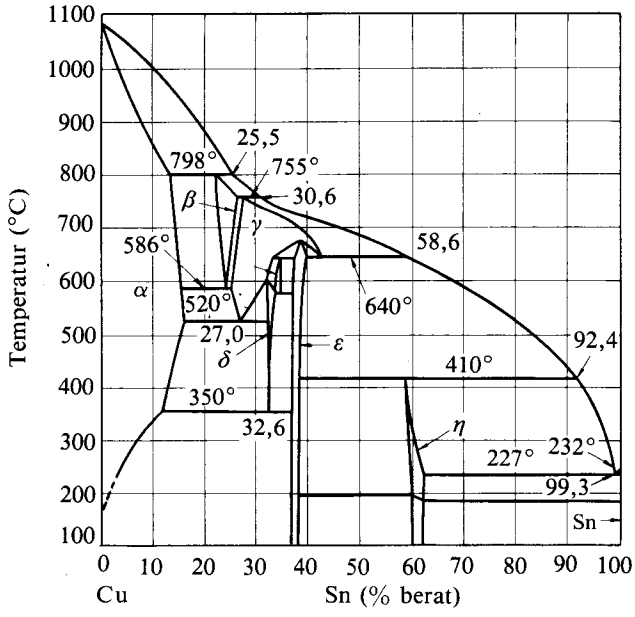
3.2.2 Perunggu (brons)

Paduan ini dikenal oleh manusia sejak lama sekali. Perunggu merupakan paduan antara Cu dan Sn dalam arti yang sempit. Tetapi dalam arti yang luas perunggu berarti paduan Cu dengan unsur logam lainnya selain dari Zn. Dibandingkan dengan tembaga murni dan kuningan, perunggu merupakan paduan yang mudah dicor dan mempunyai kekuatan yang lebih tinggi, demikian juga ketahanan ausnya dan ketahanan korosinya oleh karena itu banyak dipergunakan untuk berbagai komponen mesin, bantalan, pegas, coran artistik dsb.

(1) Perunggu timah putih

Gb. 2.46 menunjukkan diagram Cu-Sn. Ada delapan fasa yaitu α, β, γ, δ, η, ε, ξ, dan Sn. Fasa α merupakan struktur fcc pada 520°C larut pada 15,8%Sn, dan kalau temperatur diturunkan batas kelarutan padatnya juga menurun akan tetapi memerlukan waktu yang sangat lama untuk mengendapkan fasa Sn, oleh karena itu tidak perlu memperhatikan perubahan batas kelarutan padat. Selanjutnya komposisi dari paduan praktis adalah 4–12%Sn, oleh karena itu hampir tidak perlu memperhatikan fasa-fasa di daerah paduan tinggi.

Sn adalah lebih mahal dari kuningan. Oleh karena itu kuningan dipergunakan sebagai bahan baku dan selanjutnya bahan yang dicampur 4–5%Sn dipergunakan untuk keperluan khusus sedangkan hampir semua paduan perunggu ini dalam industri dipakai dalam bentuk coran. Brons timah putih mempunyai sejarah yang lama,



Gb. 2.46 Diagram fasa Cu-Sn.

sehingga dari penggunaannya paduan dasar dengan 8-12%Sn dinamakan *gun metal*, paduan dengan 10%Sn dan 23%Sn dinamakan *admiralty gun metal*, sedangkan yang mengandung 18-23%Sn disebut "brons bell" dan paduan yang mengandung 30-32% disebut "brons kaca".

(2) Perunggu posfor (brons posfor)

Pada paduan tembaga posfor berguna sebagai penghilang oksida, oleh karena itu penambahan posfor 0,05-0,5% pada paduan memberikan kecairan logam yang lebih baik. Brons posfor mempunyai sifat-sifat lebih baik dalam keelastisannya, kekuatan dan ketahanan terhadap aus. Ada tiga macam brons posfor yang dipergunakan dalam industri yaitu brons biasa yang tidak mempunyai kelebihan P yang dipakai dalam proses menghilangkan oksida, brons posfor untuk pegas dengan kadar 0,05-0,15% yang ditambahkan kepada brons yang mengandung Sn kurang dari 10% dan brons porsor untuk bantalan yang mengandung 0,3-1,5%P ditambahkan kepada brons yang mengandung lebih dari 10%Sn.

(3) Brons aluminium

Paduan yang dipergunakan dalam industri mengandung 6-7%Al dipergunakan untuk pabrikasi dan paduan dengan 9-10%Al dipergunakan untuk coran. Paduan ini mempunyai kekuatan yang baik dari pada brons timah putih dengan sifat mampu bentuk yang lebih dan ketahanan korosi yang baik, sehingga penggunaannya lebih luas. Tetapi mampu cornya kurang baik sehingga memerlukan teknik yang khusus pada pengecorannya.

3.2.3 Paduan tembaga yang dapat dikeraskan dengan presipitasi

Ada beberapa macam paduan tembaga yang mempunyai diagram fasa di mana kelarutan pada larutan padat di daerah Cu meningkat menurut temperatur. Kalau pa-

duan ini didinginkan secara tiba-tiba dari larutan padat yang homogen pada temperatur tinggi dan kemudian dituakan pada temperatur yang cocok, maka akan terjadi pengerasan oleh adanya fasa presipitasi yang halus yang terdispersikan. Sebagai tambahan terhadap paduan biner yaitu Cu–Ag, Cu–Cd, Cu–Zr, Cu–Cr, Cu–Ti, Cu–Zn, dan Cu–Be, telah ditemukan pula paduan dengan komponen banyak seperti Cu–Fe_2P–Cd, Cu–Ni_2Si, Cu–Be–Co, Cu–Ti–Sn–Cr, dsb. Di antara semua itu paduan Cu–Be mempunyai kekuatan yang paling tinggi dengan pengerasan presipitasi, penggunaannya bukan saja untuk pegas-pegas yang dapat dialiri listrik dan elektroda-elektroda untuk pengelasan titik, tetapi juga untuk palu-palu yang dipergunakan di dalam pabrik-pabrik yang mengolah produk yang bisa menyala, yang menyebabkan percikan api pada waktu dipukul.

4 | ALUMINIUM DAN PADUANNYA

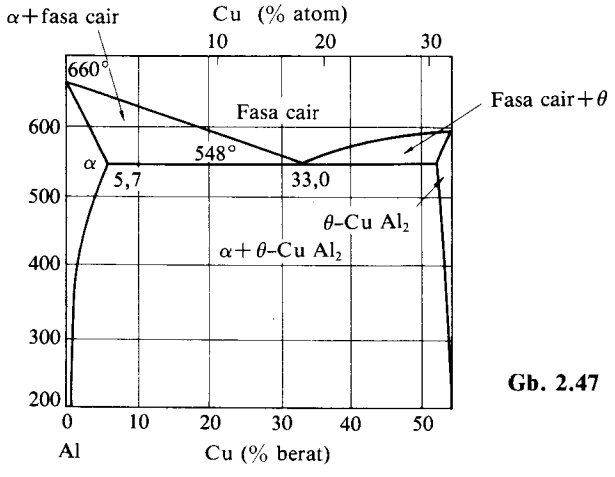
Aluminium ditemukan oleh Sir Humphrey Davy dalam tahun 1809 sebagai suatu unsur, dan pertama kali direduksi sebagai logam oleh H. C. Oersted. tahun 1825. Secara industri tahun 1886, Paul Heroult di Perancis dan C. M. Hall di Amerika Serikat secara terpisah telah memperolah logam aluminium dari alumina dengan cara elektrolisa dari garamnya yang terfusi. Sampai sekarang proses Heroult Hall masih dipakai untuk memproduksi aluminium. Penggunaan aluminium sebagai logam setiap tahunnya adalah pada urutan yang kedua setelah besi dan baja, yang tertinggi di antara logam non fero. Produksi aluminium tahunan di dunia mencapai 15 juta ton per tahun pada tahun 1981.

Aluminium merupakan logam ringan mempunyai ketahanan korosi yang baik dan hantaran listrik yang baik dan sifat-sifat yang baik lainnya sebagai sifat logam. Sebagai tambahan terhadap, kekuatan mekaniknya yang sangat meningkat dengan penambahan Cu, Mg, Si, Mn, Zn, Ni, dsb, secara satu persatu atau bersama-sama, memberikan juga sifat-sifat baik lainnya seperti ketahanan korosi, ketahanan aus, koefisien pemuaian rendah dsb. Material ini dipergunakan di dalam bidang yang luas bukan saja untuk peralatan rumah tangga tapi juga dipakai untuk keperluan material pesawat terbang, mobil, kapal laut, konstruksi dsb.

4.1 Dasar perlakuan panas paduan aluminium

4.1.1 Pengerasan presipitasi atau pengerasan penuaan

Gb.2.47 menunjukkan diagram fasa paduan Al–Cu. Perlakuan panas dan pengerasan paduan aluminium dapat dilakukan kalau sistim di antara Al dan $CuAl_2$. Larutan padat alfa di daerah sisi Al pada temperatur tinggi merupakan larutan padat



Gb. 2.47 Diagram fasa Al–Cu.

dari berbagai komponen kedua, yang kelarutannya menurun kalau temperatur diturunkan. Bagi paduan yang mempunyai diagram fasa seperti itu kalau paduan pada komposisi tertentu umpamanya 4%Cu-Al, didinginkan dari larutan padat yang homogen sampai pada temperatur memotong kurva kelarutan unsur kedua di mana konsentrasinya mencapai jenuh. Selanjutnya dengan pendinginan yang lebih jauh pada keadaan mendekati keseimbangan, fasa kedua akan terpresipitasikan. Konsentrasi dari larutan dapat berubah tergantung kepada kurva kelarutan, dan pada temperatur biasa merupakan suatu campuran antara larutan padat yang jenuh dan fasa kedua. Presipitasi tersebut memerlukan keadaan transisi dari atom yaitu difusi, yang memerlukan pula waktu yang cukup. Kalau meterial didinginkan dengan cepat dari larutan padat yang homogen pada temperatur tinggi, yaitu dengan pencelupan dingin, keadaan pada temperatur tinggi itu dapat dibawa ke temperatur yang biasa. Operasi ini dinamakan perlakuan pelarutan. Yang menghasilkan larutan padat lewat jenuh, yang merupakan fasa tidak stabil meskipun pada temperatur biasa dan cenderung untuk terjadi presipitasi dari fasa kedua, jadi larutan padat yang lewat jenuh cenderung untuk terurai dengan sendirinya menjadi larutan padat yang jenuh dan fasa kedua. Difusi atom ditentukan oleh macam atom, tetapi pada umumnya sangat lambat pada temperatur biasa dan dengan pencelupan dingin kekosongan atom tetap ada, jadi dengan berjalannya waktu struktur atom bisa berubah, yang menghasilkan perubahan sifat-sifatnya. Perubahan sifat-sifat dengan berjalannya waktu pada umumnya dinamakan penuaan. Apabila proses itu berjalan pada temperatur kamar dinamakan penuaan alamiah, sedangkan apabila proses itu terjadi pada temperatur lebih tinggi dari temperatur kamar (untuk paduan Aluminium pada 120–180°C) dinamakan penuaan buatan atau penuaan temper. Tentu saja selama penuaan terjadi berbagai perubahan dari sifat-sifat fisik dan sifat-sifat kimianya. Khusus bagi peningkatan kekerasan dan kekuatan dinamakan pengerasan penuaan, yang biasanya dipakai untuk memperkuat paduan Al, paduan Cu dan paduan Mg.

4.1.2 Perubahan struktur dalam yang diikuti oleh presipitasi

Seperti akan dikemukakan kemudian studi mengenai faktor penguatan pada paduan Al sebagai bahan struktur utama untuk pesawat terbang merupakan sejarah yang telah lama, studi yang terperinci yang dilakukan terhadap paduan Al-Cu dikatakan menyebabkan perubahan struktur dalam urutan sbb:

$$\text{Larutan pada lewat jenuh} \rightarrow [\text{GP1}] \rightarrow \theta'' \text{ (atau [GP2])}$$
$$\rightarrow \theta' - CuAl_2 \rightarrow \theta - CuAl_2.$$

(1) Larutan padat lewat jenuh

Pertama paduan diproses dengan pelarutan agar terjadi larutan padat lewat jenuh pada temperatur kamar. Pada saat ini secara simultan kekosongan atom dalam keseimbangan termal pada temperatur tinggi tetap pada tempatnya, sebagai tambahan karena tegangan termal disebabkan pendinginan cepat, terjadi cacat-cacat kisi yaitu dislokasi dan barisannya yaitu batas butir atau batas butir-sub yang memberikan pengaruh besar terhadap penuaan.

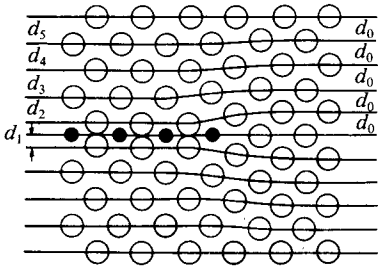
(2) Formasi dan reversi dari zona GP (zona Guinier-Preston)

Pada tahap mula dari penuaan kristal tunggal paduan 4%Cu-Al, teramati titik-titik Laue dari sinar X berasal dari agregat dua dimensi disebabkan oleh agegrasi atom Cu pada bidang (1 0 0) dari Al yang ditemukan oleh Guinier dan Preston di Perancis

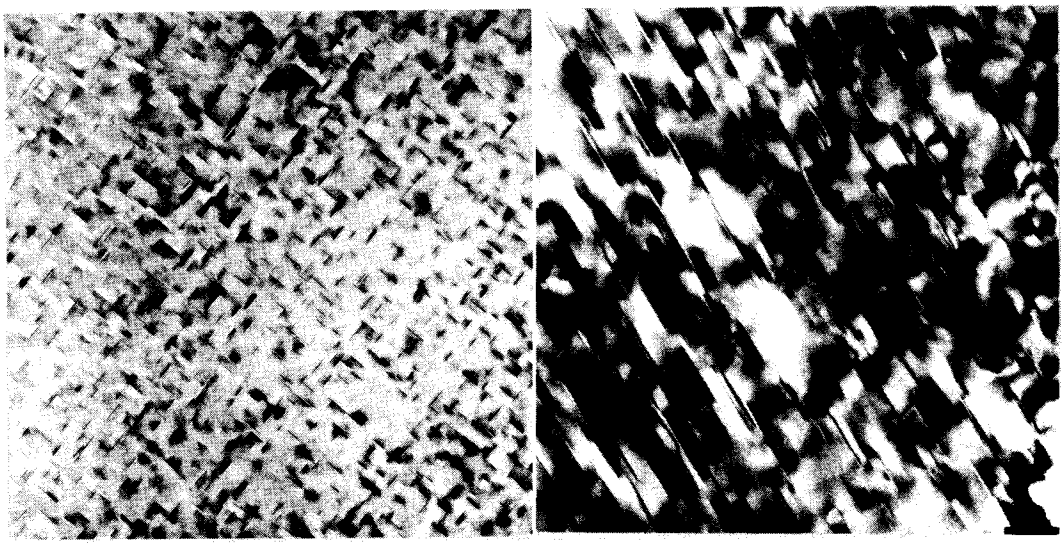
secara terpisah, ini dinamakan zona GP. Kalau cukup dituakan pada temperatur kamar, terlihat seperti plat-plat kecil dengan satu lapisan atom pada tebalnya dan kira-kira 50 Å panjangnya sebuah segmen. Gb. 2.48 menunjukkan skema V. Gerold dan Gb. 2.49 menunjukkan foto yang sama di bawah mikroskop elektron resolusi tinggi. Seperti akan dikemukakan kemudian kalau agregat seperti itu timbul, paduan tersebut menjadi keras tetapi konstanta kisi dari fasa induk sukar berubah.

Guinier menamakan zona GP yang terbentuk pada tahap mula GP [1] dan selanjutnya ditemukan θ'' dengan arah yang teratur. Silocock dkk menamakannya GP [2]. Seperti telah dikemukakan di atas agregat terlarut koheren dengan matriks aluminium terbentuk pada tahap mula dari penuaan ditemukan dalam bentuk plat, sperular, atau bentuk asirkular, yang umumnya dinamakan zona GP. Bentuk tsb ditemukan dalam paduan Al-Ag, Al-Zn, Al-Cu-Mg, Al-Mg, Al-Mg_2Si, dsb.

Kalau paduan dituakan pada temperatur biasa dan dipanaskan pada temperatur lebih tinggi ia akan menjadi lebih lunak sampai kekerasannya sama seperti pada waktu



Gb. 2.48 Agregat GPI paduan Al-Cu (Gerold).



a b

a: Dituakan pada 150°C selama 30 menit, zona GP (1) 200.000 kali.
b: Dituakan selama 48 jam, zona GP (2) 200.000 kali.

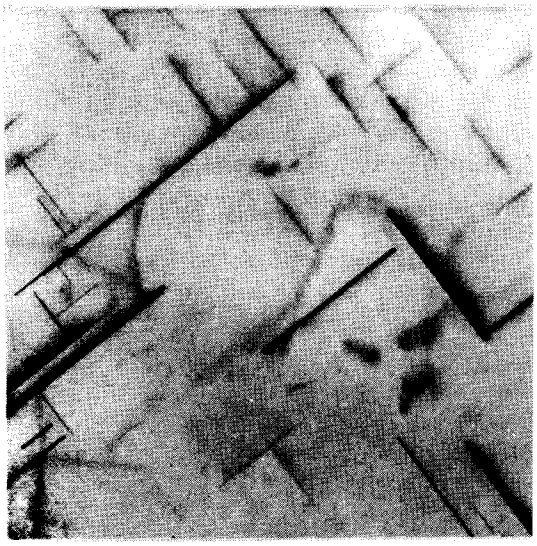
Gb. 2.49 Gambar mikroskopi elektron dari zona Guinier-Preston (GP) dalam paduan Al-4% Cu kristal tunggal, dengan perlakuan pelarutan pada 520°C, (Dipotret oleh Y. Kojima).

dicelup dingin, pola sinar X menunjukkan hal yang sama seperti pada saat setelah pencelupan dingin.

Kemudian kalau dituakan pada temperatur biasa di bawah kondisi tsb, akan mengeras lagi. Fenomena ini dinamakan reversi. GP [1] stabil pada temperatur biasa, tetapi tidak stabil pada temperatur atau di atas temperatur tertentu, disebabkan karena larut lagi dan menghilang. GP [2] juga mempunyai fenomena reversi.

(3) Presipitasi fasa antara θ''-Cu-Al_2

Kalau paduan Al-Cu dinaikkan temperatur penuaannya atau waktu penuaannya diperpanjang pada temperatur tetap, titik-titik pada gambar Laue menjadi titik-titik yang kabur disebabkan karena perubahan fasa presipitasi dengan struktur kristal yang teratur, yang berbeda dari fasa ekivalen θ-$CuAl_2$. Fasa ini dinamakan fasa antara θ' - $CuAl_2$. Ia sebagian koheren dengan kisi induk dari Al pada hubungan arah yang tetap. Keadaan ini cukup dapat diamati di bawah mikroskop elektron dalam bentuk plat mengarah pada suatu arah yang tetap, seperti ditunjukkan pada Gb. 2.50.



(Dipotret oleh Y. kojima)

Gb. 2.50 Gambar mikroskopi elektron fasa θ' dari $CuAl_2$. Paduan yang sama dengan Gb. 2.49, dituakan pada 200°C selama 2 jam, 200.000 kali (Dipotret oleh Y. Kojima).

Tabel 2.20 Fasa presipitasi terbentuk selama penuaan paduan biner Al-Cu (Silcock dkk).

Temperatur penuaan (°C)	Konsentrasi paduan			
	2% Cu	3% Cu	4% Cu	4,5% Cu
110	GP[1]	GP[1]	GP[1]	GP[1]
130	θ' atau θ'' dan GP[2] atau GP[1]	GP[1]	GP[1]	GP[1]
165	—	θ' dan GP[2] sesaat	GP[1] dan GP[2]	—
190	θ'	θ' GP[2] terbatas	GP[2] dan θ' terbatas	GP[2]
220	θ'	—	θ'	θ'
240	—	—	θ'	—

(4) Presipitasi fasa keseimbangan θ-$CuAl_2$

Kalau temperatur dinaikkan atau waktu penuaan diperpanjang selanjutnya θ' - $CuAl_2$ berubah menjadi θ-$CuAl_2$ atau langsung menjadi presipitasi θ. θ menjadi terdispersikan terpisah dari matriks Al, yang menjadi lunak.

Proses presipitasi tsb berhubungan dengan kosentrasi paduan dan temperatur penuaan. Tabel 2.20 menunjukkan hubungan antara konsentrasi, temperatur

penuaan, dan fasa presipitasi dari paduan.

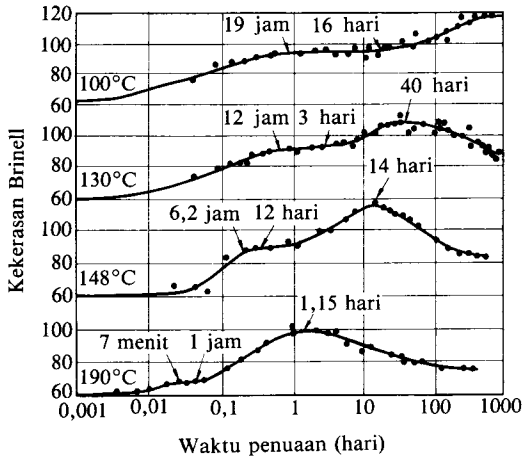
4.1.3 Perubahan sifat-sifat mekanis yang disertai oleh presipitasi

Gb. 2.51 menunjukkan perubahan kekerasan terhadap waktu penuaan kalau paduan 4%Cu-Al dituakan setelah perlakuan pelarutan pada temperatur yang bersangkutan.

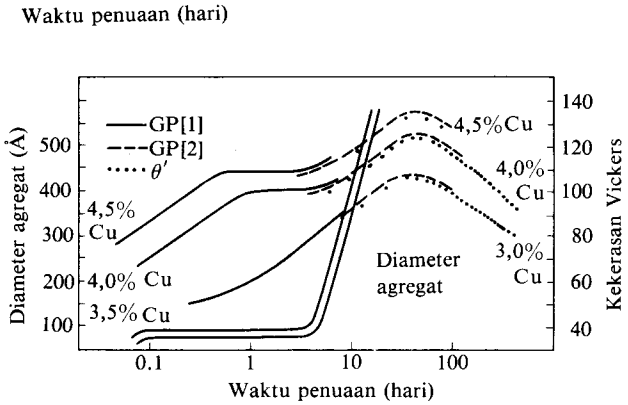
Penuaan pada temperatur biasa selesai dengan satu tahap perubahan, tetapi pada temperatur di atas 100°C terjadi dua tahap pengerasan. Fasa-fasa memberikan sumbangan terhadap pengerasan adalah GP [1], θ'', GP [2], θ' $Cu-Al_2$. Fasa θ-$CuAl_2$ yang kasar tidak memberi sumber sumbangan terhadap pengerasan. Gb. 2.52 menunjukkan hasil identifikasi fasa-fasa pada kondisi yang simultan dari pengamatan-kekerasan dan sinar X. Telah dijelaskan bahwa pengerasan tahap pertama disebabkan oleh GP [1], perubahan tahap kedua oleh GP [2] dan oleh fasa antara yang halus yaitu presipitasi θ''. Pengerasan dua tahap tersebut di atas juga terdapat pada sistim Al-Mg_2Si dan sistim Al-Cu-Mg.

Pada tahap terakhir dari presipitasi fasa antara dan apabila telah terjadi presipitasi fasa keseimbangan, paduan menjadi lunak kembali, hal ini dinamakan penuaan lebih.

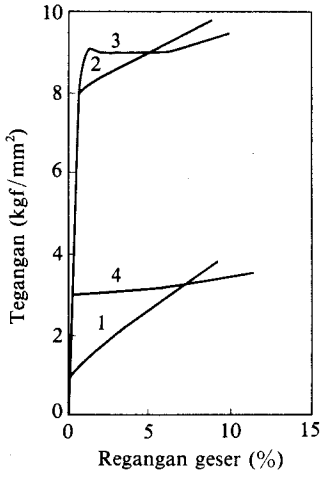
Sesuai dengan perubahan kekerasan sifat mekaniknyapun berubah. Gb. 2.53 menunjukkan perubahan pada kurva tegangan-regangan. Pada umumnya kalau



Gb. 2.51 Pengerasan penuaan dua tahap dari paduan Al-4% Cu (Gayler).



Gb. 2.52 Fasa presipitasi selama penuaan pada 130 °C dan pengerasan penuaan dua tahap paduan Al-Cu (Silcock).



1: Dituakan selama 2 hari pada 350°C, $CuAl_2$ koheren berjarak 25.000 Å.
2: Dituakan selama 27,5 jam pada 190°C, $CuAl_2$ yang tidak koheren berjarak 400 Å.
3: Dituakan selama 2 hari pada 130°C, GP (1), berdiameter 100 Å dengan ketebalan 1 atom.
4: Setelah dicelup dingin, larutan padat.

Gb. 2.53 Perubahan pada diagram tegangan-regangan disebabkan oleh presipitasi pada paduan Al–2% Cu (R. J. Price & A. Kelly: Acta Met. *12* (1964), 159).

pengerasan terjadi, tegangan mulur dan kekuatan tarik meningkat sedangkan perpanjangan menurun. Sejalan dengan itu dengan memanfaatkan perlakuan penuaan yang sesuai akan didapat material yang sangat kuat.

4.2 Aluminium murni

Al didapat dalam keadaan cair dengan elektrolisa, umumnya mencapai kemurnian 99,85% berat. Dengan mengelektrolisa kembali dapat dicapai kemurnian 99,99, yaitu dicapai bahan dengan angka sembilannya empat.

Tabel 2.21 Sifat-sifat fisik aluminium.

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)	
	99,996	>99,0
Masa jenis (20°C)	2,6989	2,71
Titik cair	660,2	653–657
Panas jenis (cal/g·°C) (100°C)	0,2226	0,2297
Hantaran listrik (%)	64,94	59 (dianil)
Tahanan listrik koefisien temperatur (/°C)	0,00429	0,0115
Koefisien pemuaian (20–100°C)	$23{,}86\times10^{-6}$	$23{,}5\times10^{-6}$
Jenis kristal, konstanta kisi	*fcc*, a=4,013 kX	*fcc*, a=4,04 kX

Catatan: *fcc*: face centered cubic=kubus berpusat muka

Tabel 2.22 Sifat-sifat mekanik aluminium.

Sifat-sifat	Kemurnian Al (%)			
	99,996		>99,0	
	Dianil	75% dirol dingin	Dianil	H18
Kekuatan tarik (kg/mm²)	4,9	11,6	9,3	16,9
Kekuatan mulur (0,2%) (kg/mm²)	1,3	11,0	3,5	14,8
Perpanjangan (%)	48,8	5,5	35	5
Kekerasan Brinell	17	27	23	44

Tabel 2.21 menunjukkan sifat-sifat fisik Al dan Tabel 2.22 menunjukkan sifat-sifat mekaniknya. Ketahanan korosi berubah menurut kemurnian, pada umumnya untuk kemurnian 99,0% atau di atasnya dapat dipergunakan di udara tahan dalam waktu bertahun-tahun. Hantaran listrik Al, kira-kira 65% dari hantaran listrik tembaga, tetapi masa jenisnya kira-kira sepertiganya sehingga memungkinkan untuk memperluas penampangnya. Oleh karena itu dapat dipergunakan untuk kabel tenaga dan dalam berbagai bentuk umpamanya sebagai lembaran tipis (*foil*). Dalam hal ini dapat dipergunakan Al dengan kemurnian 99,0%. Untuk reflektor yang memerlukan reflektifitas yang tinggi juga untuk kondensor elektrolitik dipergunakan Al dengan angka sembilan empat.

4.3 Paduan aluminium

4.3.1 Klasifikasi paduan aluminium

Paduan Al diklasifikasikan dalam berbagai standar oleh berbagai negara di dunia. Saat ini klasifikasi yang sangat terkenal dan sempurna adalah standar Aluminium Association di Amerika (AA) yang didasarkan atas standar terdahulu dari Alcoa (Aluminium Company of America). Paduan tempaan dinyatakan dengan satu atau dua angka "S", sedangkan paduan coran dinyatakan dengan 3 angka. Standar AA menggunakan penandaan dengan 4 angka sbb: Angka pertama menyatakan sistim paduan dengan unsur-unsur yang ditambahkan, yaitu:

1: Al murni, 2: Al-Cu, 3: Al-Mn, 4: Al-Si, 5: Al-Mg, 6: Al-Mg-Si dan 7: Al-Zn, sebagai contoh, paduan Al-Cu.

dinyatakan dengan angka 2000. Angka pada tempat kedua menyatakan kemurnian dalam paduan yang dimodifikasi dan Al murni sedangkan angka ketiga dan keempat dimaksudkan untuk tanda Alocoa terdahulu kecuali S, sebagai contoh, 3 S sebagai 3003 dan 63S sebagai 6063. Al dengan kemurnian 99,0% atau di atasnya dengan ketakmurnian terbatas (2S) dinyatakan sebagai 1100. Tabel 2.23 menunjukkan hubungan tersebut.

Dalam paduan Al perubahan yang berarti dari meterial disebabkan oleh perlakuan panas telah dikenal, yang dinyatakan dalam Tabel 2.24, sebagai contoh untuk 7075-T6.

4.3.2 Paduan Al utama

(1) Al-Cu dan Al-Cu-Mg

Seperti telah dikemukakan pada 4.1.1 dan 4.1.2, terjadi pengerasan penuaan. Sebagai paduan coran dipergunakan paduan yang mengandung 4-5%Cu. Ternyata

Tabel 2.23 Klasifikasi paduan aluminium tempaan.

Standar AA	Standar Alcoa terdahulu	Keterangan
1001	1S	Al murni 99,5% atau di atasnya
1100	2S	Al murni 99,0% atau di atasnya
2010-2029	10S-29S	Cu merupakan unsur paduan utama
3003-3009	3S-9S	Mn 〃
4030-4039	30S-39S	Si 〃
5050-5086	50S-69S	Mg 〃
6061-6069		Mg_2Si 〃
7070-7079	70S-79S	Zn 〃

Tabel 2.24 Klasifikasi perlakuan bahan.

Tanda	Perlakuan
-F	Setelah pembuatan
-O	Dianil penuh
-H	Pengerasan regangan
-H 1*n*	Pengerasan regangan
-H 2*n*	Sebagian dianil setelah pengerasan regangan
-H 3*n*	Dianil untuk penyetabilan setelah pengerasan regangan *n*=2 (1/4 keras), 4 (1/2 keras), 6 (3/4 keras), 8 (keras), 9 (sangat keras)
-T	Perlakuan panas
-T2	Penganilan penuh (hanya untuk coran)
-T3	Pengerasan regangan setelah perlakuan pelarutan
-T4	Penuaan alamiah penuh setelah perlakuan pelarutan
-T5	Penuaan tiruan (tanpa perlakuan pelarutan)
-T6	Penuaan tiruan setelah perlakuan pelarutan
-T7	Penyetabilan setelah perlakuan pelarutan
-T8	Perlakuan pelarutan, pengerasan regangan, penuaan tiruan.
-T9	Perlakuan pelarutan, penuaan tiruan, pengerasan regangan.
-T10	Pengerasan regangan setelah penuaan tiruan

dari fasanya paduan ini mempunyai daerah luas dari pembekuannya, penyusutan yang besar, risiko besar pada kegetasan panas dan mudah terjadi retakan pada coran. Adanya Si sangat berguna untuk mengurangi keadaan itu dan penambahan Ti sangat efektif untuk memperhalus butir. Dengan perlakuan panas T6 pada coran dapat dibuat bahan yang mempunyai kekuatan tarik kira-kira 25 kgf/mm^2.

Sebagai paduan Al-Cu-Mg paduan yang mengandung 4%Cu dan 0,5%Mg dapat mengeras dengan sangat dalam beberapa hari oleh penuaan pada temperatur biasa setelah pelarutan, paduan ini ditemukan oleh A. Wilm dalam usaha mengembangkan paduan Al yang kuat yang dinamakan duralumin. Selanjutnya sangat banyak studi telah dilakukan, mengenai paduan ini. Khususnya Nishimura menemukan dua senyawa terner berada dalam keseimbangan dengan Al, yang dinamakan senyawa S dan T, dan ternyata bahwa senyawa S (Al_2CuMg) mempunyai kemampuan penuaan pada temperatur biasa. Duralumin adalah paduan praktis yang sangat terkenal disebut paduan 2017, komposisi standarnya adalah Al-4%Cu-0,5%Mg-0,5%Mn. Paduan di mana Mg ditingkatkan pada komposisi standar dari Al-4,5%Cu-1,5%Mg-0,5%Mn dinamakan paduan 2024, nama lamanya disebut duralumin super. Paduan yang mengandung Cu mempunyai ketahanan korosi yang jelek, jadi apabila ketahanan korosi yang khusus diperlukan permukaannya dilapisi dengan Al murni atau paduan Al yang tahan korosi yang disebut pelat alklad.

Paduan dalam sistem itu terutama dipakai sebagai bahan pesawat terbang. Tabel 2.25 menunjukkan perlakuan panas dan sifat-sifat mekanik dari paduan khusus tersebut.

(2) Paduan Al-Mn

Mn adalah unsur yang memperkuat Al tanpa mengurangi ketahanan korosi, dan dipakai untuk membuat paduan yang tahan korosi. Dalam diagram fasa Al-Mn yang ada dalam keseimbangan dengan larutan padat Al adalah Al_6Mn (25,3%Mn), sistim ortorombik a=6,498 Å, b=7,552 Å, c=8,870 Å), dan kedua fasa mempunyai titik eutektik pada 658,5°C, 1,95% Mn. Kelarutan padat maksimum pada temperatur eutektik adalah 1,82% dan pada 500°C 0,36%, sedangkan pada temperatur biasa kelarutannya hampir 0.

Tabel 2.25 Sifat-sifat mekanik paduan Al-Cu-Mg.

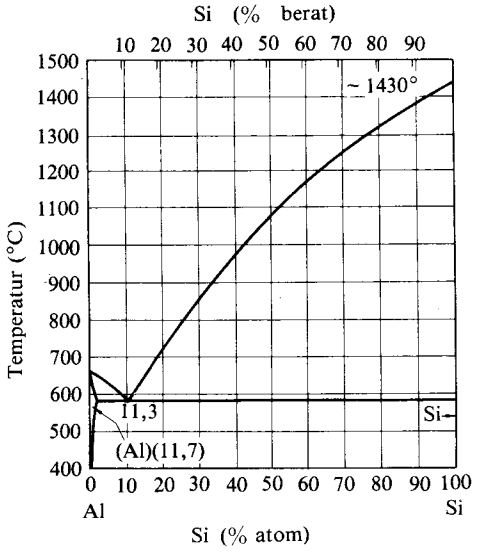
Paduan	Keadaan	Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Kekuatan mulur (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Kekuatan geser (kgf/mm^2)	Kekerasan Brinell	Batas lelah (kgf/mm^2)
17S (2017)	O	18,3	7,0	—	12,7	45	7,7
	T4	43,6	28,1	—	26,7	105	12,7
A17S (A2017)	T4	30,2	16,9	27	19,7	70	9,5
R317	Setelah dianil	42,9	24,6	22	—	100	—
24S (2024)	O	18,9	7,7	22	12,7	42	—
	T4	47,8	32,3	22	28,8	120	—
	T36	51,3	40,1	—	29,5	130	—
14S (2014)	O	19,0	9,8	18	12,7	45	—
	T4	39,4	28,0	25	23,9	100	—
	T4	49,0	42,0	13	29,5	135	—

Sebenarnya paduan Al-1,2%Mn dal Al-1,2%Mn-1,0%Mg dinamakan paduan 3003 dan 3004 yang dipergunakan sebagai paduan tahan korosi tanpa perlakuan panas.

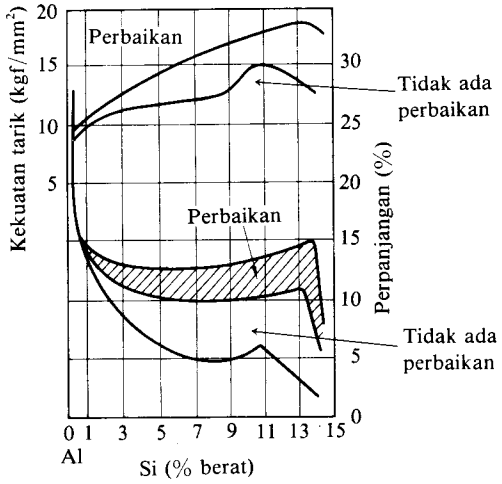
(3) Paduan Al-Si

Gb. 2.54 menunjukkan diagram fasa dari sistim ini. Ini adalah tipe eutektik yang sederhana yang mempunyai titik eutektik pada 577°C, 11,7%Si, larutan padat terjadi pada sisi Al. Karena batas kelarutan padat sangat kecil maka pengerasan penuaan sukar diharapkan.

Kalau paduan ini didinginkan pada cetakan logam, setelah cairan logam diberi natrium flourida kira-kira 0,05-1,1% kadar logan natrium, tampaknya temperatur eutektik meningkat kira-kira 15°C, dan komposisi eutektik bergeser ke daerah kaya Si kira-kira pada 14%. Hal ini biasa terjadi pada paduan hipereuektik seperti 11,7-14% Si, Si mengristal sebagai kristal primer, tetapi karena perlakuan yang disebut di atas



Gb. 2.54 Diagram fasa Al-Si.



Gb. 2.55 Perbaikan sifat-sifat mekanik oleh modifikasi paduan Al-Si.

Al mengristal sebagai kristal primer dan struktur eutektiknya menjadi sangat halus. Ini dinamakan struktur yang dimodifikasi. Sifat-sifat mekaniknya sangat diperbaiki yang ditunjukkan pada Gb. 2.55. Fenomena ini ditemukan oleh A. Pacz tahun 1921 dan paduan yang telah diadakan perlakuan tersebut dinamakan silumin.

Paduan Al-Si sangat baik kecairannya, yang mempunyai permukaan bagus sekali, tanpa kegetasan panas, dan sangat baik untuk paduan coran, Sebagai tambahan, ia, mempunyai ketahanan korosi yang baik, sangat ringan, koefisien pemuaian yang kecil dan sebagai penghantar yang baik untuk listrik dan panas. Karena mempunyai kelebihan yang menyolok, paduan ini sangat banyak dipakai. Paduan Al-12%-Si sangat banyak dipakai untuk paduan cor cetak. Tetapi dalam hal ini modifikasi tidak perlu dilakukan. Sifat-sifat silumin sangat diperbaiki oleh perlakuan panas dan sedikit diperbaiki oleh unsur paduan. Umumnya dipakai paduan dengan 0,15-0,4% Mn dan 0,5%Mg. Paduan yang diberi perlakuan pelarutan dan dituakan dinamakan silumin γ, dan yang hanya ditemper saja dinamakan silumin β. Paduan yang memerlukan perlakuan panas ditambah dengan Mg juga Cu serta Ni untuk memberikan kekerasan pada saat panas, bahan ini biasa dipakai untuk torak motor, Tabel 2.26 menunjukkan kekuatan panas dari contoh bahan tsb.

Tabel 2.26 Kekuatan tarik panas paduan Al-Si-Ni-Mg.

Paduan	Perlakuan	Temperatur uji (°C)	Sifat-sifat mekanik		
			Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Kekuatan mulur (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)
Alcoa 32S Al-12,5Si-1,0Mg-0,9Cu-0,9Ni (untuk dibentuk)	T6: 510-521°C, 4 jam dicelup dingin di air, 160-174°C, 6-10 jam penuaan	24	39,2	32,2	8
		204	11,2	7,7	30
		316	4,2	2,5	60
		371	2,5	1,4	120
Alcoa A 132 Al-12Si-2,5Ni-1,2Mg-0,8Cu (untuk dicor cetak)	T551: 168-174°C, 14-18 jam dianil, tanpa perlakuan pelarutan	24	25,2	19,6	0,5
		204	16,1	9,5	2,0
		316	7,7	3,5	8,0
Alcao D 132 Al-9Si-3,5Cu-0,8Mg-0,8Ni (untuk dicor cetak)	T5: 204°C, 7-9 jam dianil, tanpa perlakuan pelarutan	24	25,2	19,6	1,0
		204	14,4	9,1	5,0
		316	6,3	4,2	20,0
		371	3,9	2,8	40,0

Koefisien pemuaian termal dari Si sangat rendah, oleh karena itu paduannyapun mempunyai koefisien yang rendah apabila ditambah Si lebih banyak. Berbagai cara dicoba untuk memperhalus butir primer Si, dan telah dikembangkan paduan hypereutektik Al-Si sampai 29%Si. Dalam hal ini penghalusan kristal primer Si yang dijelaskan di atas tidaklah efektif tetapi dengan penambahan P oleh paduan Cu-P atau penambahan fosfor klorida (PCl_5) untuk mencapai presentasi 0,001%P, dapat tercapai penghalusan kristal primer dan homogenisasi. Paduan Al-Si banyak dipakai sebagai elektroda untuk pengelasan yaitu terutama yang mengandung 5%Si.

(4) Paduan Al-Mg

Dalam paduan biner Al-Mg satu fasa yang ada dalam keseimbangan dengan larutan padat Al adalah larutan padat yang merupakan senyawa antar logam yaitu Al_3Mg_2. Sel satuannya merupakan hexagonal susunan rapat (*cph*) tetapi juga ada dilaporkan bahwa sel satuannya merupakan kubus berpusat muka (*fcc*) rumit. Titik eutektiknya adalah 450°C, 35%Mg dan batas kelarutan padatnya pada temperatur

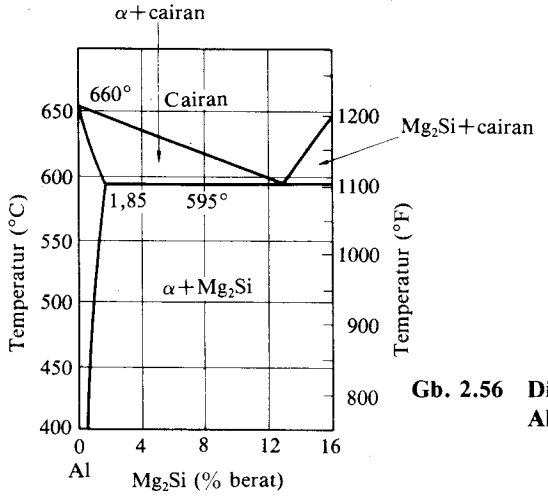
eutektik adalah 17,4%Mg, yang menurun pada temperatur biasa sampai kira-kira 1,9%Mg, jadi kemampuan penuaan dapat diharapkan. Secara praktis penambahan Mg tidaklah banyak, pengerasan penuaan yang berarti tidak diharapkan. Senyawa β mempunyai masa jenis yang rendah dan mudah teroksidasi, oleh karena itu biasanya ditambahkan sedikit flux dari Be, sebagai contoh 0,004%.

Paduan Al-Mg mempunyai ketahanan korosi yang sangat baik, sejak lama disebut hidronalium dan dikenal sebagai paduan yang tahan korosi. Cu dan Fe sangat berbahaya bagi ketahanan korosi, terutama Cu sangat memberikan pengaruhnya. Maka perlu perhatian khusus terhadap tercampurnya unsur pengotor.

Paduan dengan 2-3%Mg dapat mudah ditempa, dirol dan diekstruksi, dan paduan 5052 adalah paduan yang biasa dipakai sebagai bahan tempaan. Paduan 5056, adalah paduan yang paling kuat dalam sistim ini, dipakai setelah dikeraskan oleh pengerasan regangan apabila diperlukan kekerasan tinggi. Paduan 5083 yang dianil adalah paduan antara (4,5%Mg) kuat dan mudah dilas, oleh karena itu sekarang dipakai sebagai bahan untuk tangki LNG. Tabel 2.27 menunjukkan sifat-sifat mekanis paduan tempaan Al-Mg.

Tabel 2.27 Sifat-sifat mekanik paduan Al-Mg.

Paduan	Keadaan	Sifat-sifat mekanik					
		Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Kekuatan mulur (0,2%) (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Kekuatan geser (kgf/mm^2)	Kekerasan Brinell	Batas lelah 5×10^8 (kgf/mm^2)
5052	O	21,9	8,4	30	12,7	45	12,0
(Al-2,5Mg-0,25Cr)	H38	28,8	25,3	8	16,9	85	13,4
5056	O	29,5	15,5	35	18,3	—	14,1
(Al-5,2Mg-0,1Mn-0,1Cr)	H18	43,6	40,8	6	23,2	—	15,5



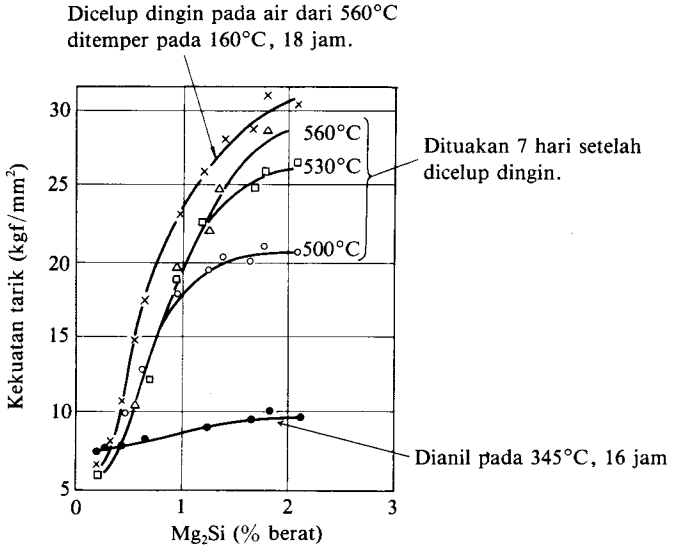
Gb. 2.56 Diagram fasa biner semu dari paduan Al-Mg_2Si.

(5) Paduan Al-Mg-Si

Kalau sedikit Mg ditambahkan kepada Al, pengerasan penuaan sangat jarang terjadi, tetapi apabila secara simultan mengandung Si, maka dapat dikeraskan dengan penuaan panas setelah perlakuan pelarutan. Hal ini disebabkan karena senyawa Mg_2Si berkelakuan sebagai komponen murni dan membuat keseimbangan dari sistim biner semu dengan Al. Gb. 2.56 menunjukkan diagram fasa paduan Al-Mg_2Si. Yang

berasal dari kelarutan yang menurun dari Mg_2Si terhadap larutan padat Al dari temperatur tinggi ke temperatur yang lebih rendah. Sebagai paduan praktis dapat diperoleh paduan 5053, 6063 dan 6061. Paduan dalam sistim ini mempunyai kekuatan kurang sebagai bahan tempaan dibandingkan dengan paduan-paduan lainnya, tetapi sangat liat, sangat baik mampu bentuknya untuk penempaan, ekstrusi dsb, dan sangat baik untuk mampu bentuk yang tinggi pada temperatur biasa. Mempunyai mampu bentuk yang baik pada ekstrusi dan tahan korosi, dan sebagai tambahan dapat diperkuat dengan perlakuan panas setelah pengerjaan. Paduan 6063 dipergunakan banyak untuk rangka-rangka konstruksi. Karena paduan dalam sistim ini mempunyai kekuatan yang cukup baik tanpa mengurangi hantaran listrik, maka dipergunakan untuk kabel tenaga. Dalam hal ini pencampuran dengan Cu, Fe dan Mn perlu dihindari karena unsur-unsur itu menyebabkan tahanan listrik menjadi tinggi.

Gb. 2.57 menunjukkan hubungan antara kekuatan setelah penuaan dan kadar Mg_2Si. Pada temperatur biasa cukup untuk dapat dikeraskan dengan penuaan akan tetapi pengerasan maksimum dapat dicapai dengan jalan perlakuan pelarutan pada 500°C, pencelupan dingin dan ditemper pada 160°C selama 18 jam. Selanjutnya Tabel 2.28 menunjukkan contoh perlakuan panas dan sifat-sifat mekanik untuk paduan sistim ini.



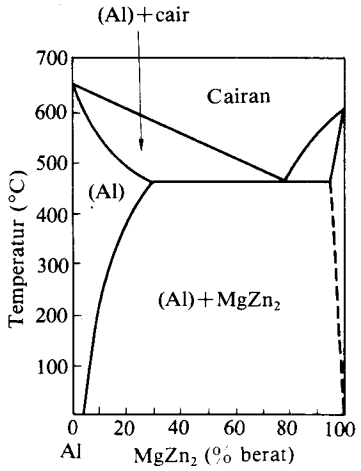
Gb. 2.57 Pengaruh kadar Mg_2Si pada kekuatan tarik paduan Al-Mg_2Si.

Tabel 2.28 Sifat-sifat mekanik paduan Al-Mg_2-Si.

Paduan	Keadaan	Kekuatan tarik (kgf/mm²)	Kekuatan mulur (kgf/mm²)	Perpanjangan (%)	Kekuatan geser (kgf/mm²)	Kekerasan Brinell	Batas lelah (kgf/mm²)
6061	O	12,6	5,6	30	8,4	30	6,3
	T4	24,6	14,8	28	16,9	65	9,5
	T6	31,6	28,0	15	21,0	95	9,5
6063	T5	19,0	14,8	12	11,9	60	6,7
	T6	24,6	21,8	12	15,5	73	6,7
	T83	26,0	24,6	11	15,5	82	—

(6) Paduan Al-Mg-Zn

Seperti telah ditunjukkan pada Gb. 2.58 aluminium menyebabkan keseimbangan biner semu dengan senyawa antar logam $MgZn_2$, dan kelarutannya menurun apabila temperatur turun. Telah diketahui sejak lama bahwa paduan sistim ini dapat dibuat keras sekali dengan penuaan setelah perlakuan pelarutan. Tetapi sejak lama tidak dipakai sebab mempunyai sifat patah getas oleh retakan korosi tegangan. Di Jepang pada permulaan tahun 1940 Igarashi dkk mengadakan studi dan berhasil dalam pengembangan suatu paduan dengan panambahan kira-kira 0,3%Mn atau Cr, di mana butir kristal padat diperhalus, dan mengubah bentuk presipitasi serta retakan korosi tegangan tidak terjadi. Pada saat itu paduan tsb dinamakan ESD, duralumin super ekstra. Selama perang dunia ke II di Amerika Serikat dengan maksud yang hampir sama telah dikembangkan pula suatu paduan. Yaitu suatu paduan yang terdiri dari: Al-5,5%Zn-2,5%Mn-1,5%Cu-0,3%Cr-0,2%Mn, sekarang dinamakan paduan 7075. Paduan ini mempunyai kekuatan tertinggi di antara paduan-paduan lainnya, sifat-sifat mekaniknya ditunjukkan pada Tabel 2.29. Penggunaan paduan ini yang paling besar adalah untuk bahan konstruksi pesawat udara. Di samping itu penggunaannya menjadi lebih penting sebagai bahan konstruksi.



Gb. 2.58 Diagram fasa biner semu dari paduan Al-$MgZn_2$.

Tabel 2.29 Sifat-sifat mekanik paduan 7075.

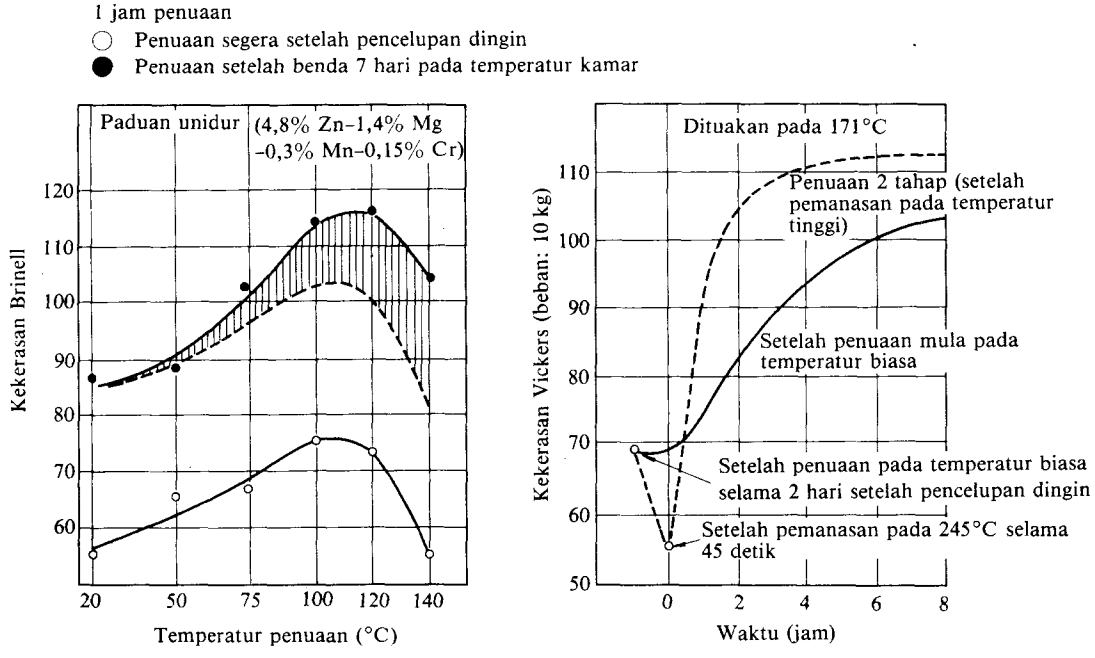
Perlakuan panas	Kekuatan tarik (kgf/mm²)	Kekuatan mulur (kgf/mm²)	Perpanjangan (%)		Kekerasan		Kekuatan geser (kgf/mm²)	Batas lelah (kgf/mm²)
			(a)	(b)	Rockwell	Brinell		
Bukan klad								
O	23,2	10,5	17	16	E60-70	60	15,5	—
T6	58,4	51,3	11	11	B85-95	150	33,8	16,2
Klad								
O	22,5	9,8	17	—	—	—	15,5	—
T6	53,4	47,1	11	—	E88-111	—	32,3	—

(a) Pelat tipis 1,6 mm, (b) Batang bulat ϕ 12,5

(7) Penghalusan fasa antara dan penuaan dua tahap

Untuk mendapat kekuatan tinggi pada penuaan fasa presipitat halus dan homogen perlu terdispersikan. Pada kekuatan yang tertinggi terjadi fasa antara yang telah dijelaskan sebelumnya. Dalam mendispersikan fasa antara halus secara homogen, kondisi sebelum penuaan panas merupakan hal sangat penting. Apabila setelah perlakuan pelarutan tidak dilakukan penuaan panas atau dibiarkan pada temperatur biasa saja, atau dengan pemanasan yang terlambat, penuaan temperatur rendah terjadi sebelum mencapai temperatur penuaan, ini berarti bahwa penuaan mula telah dibuat yang berhubungan dengan pembentukan zona GP. Berkenaan dengan paduan Al praktis, telah dikenal bahwa ada dua kasus; kekuatan setelah penuaan panas sangat ditingkatkan oleh penuaan mula, dan bertentangan dengan itu kekuatannya dirusak. Penuaan mula sangat menguntungkan bagi paduan Al-Mg-Zn dan tidak menguntungkan bagi paduan Al-Mg-Si pada kondisi-kondisi tertentu. Fenomena ini dinamakan penuaan dua tahap atau juga penuaan pisah. Hal ini bukan hanya penting bagi praktek tetapi juga sebagai subjek untuk banyak penelitian karena hal ini sangat menarik perhatian secara akademis.

Gb. 2.59 menunjukkan contoh paduan Unidur dari Al Swiss seperti ditunjukkan pada gambar (a) penuaan pada temperatur bisa untuk satu minggu sangat meningkatkan kekerasan setelah penuaan panas berikutnya. Selanjutnya gambar (b) menyatakan bahwa dalam suatu paduan Al-Mg-Si jumlah Mg_2Si yang terkandung lebih dari 0,9% hasil penuaan mulanya tidak menguntungkan. Menurut gambar mikroskopi elektron, dalam setiap hal yang menguntungkan, terlihat adanya fasa antara yang halus dan terdistribusikan secara homogen.



(a) Pengaruh penuaan mula pada temperatur kamar pada paduan Al-Zn-Mg (Hug)

(b) Pengaruh penuaan mula dan penuaan dua tahap pada paduan Al-Mg-Si (Fortin)

Gb. 2.59 Pengaruh penuaan dua tahap pada perlakuan panas paduan praktis.

5 MAGNESIUM DAN PADUANNYA

Magnesium dan paduannya merupakan bahan yang paling ringan di antara logam-logam industri mempunyai masa jenis kira-kira 1,8, yang dipergunakan untuk pesawat terbang dan mobil. Sifat-sifat mekanik paduan magnesium tidak kurang dibandingkan dengan paduan aluminium, terutama mampu-mesinnya yang baik sekali walaupun ada keburukannya yaitu mudah menyala dan tidak tahan korosi. Dalam hal ini diperlukan perhatian khusus mengenai pembubutan dst. Oleh karena itu penggunaan praktisnya tidak terlalu maju. Akan tetapi berkat perkembangan dalam cara-cara proses pengerjaan logam, kemurnian logam ingot yang telah diperbaiki dan cara pemaduan logam yang telah maju, maka paduan magnesium dengan kekhasannya itu telah lebih luas penggunaannya.

5.1 Perkembangan magnesium dan paduannya

Logam Mg telah dibuat secara industri dalam tahun 1930-an dengan jalan elektrolisa campuran kloridanya yang terfusikan. Setelah itu kira-kira 1956, telah dikembangkan secara industri, suatu cara yang dinamakan cara Pidgeon di mana campuran dolomit yang dikalsinasikan dan ferosilikon dalam bentuk bubuk direduksi dalam vakum pada temperatur tinggi. Jadi sekarang logam yang sangat murni lebih mudah didapat. Tabel 2.30 menunjukkan perbandingan bahan yang dibuat dengan cara itu. Logam megnesium dengan kemurnian yang biasa yang dihasilkan dengan cara elektrolisa, rusak dalam waktu yang singkat apabila dicelupkan ke dalam air laut atau air garam, sedangkan logam magnesium dengan kemurnian yang tinggi yang didapat dari proses Pidgeon dari reduksi destilasi, atau paduannya sukar untuk terkorosi. Ketahanan korosinya mendekati ketahanan korosi paduan aluminium dan lebih baik dari pada ketahanan korosi baja lunak. Ketahanan korosi Mg tergantung pada ketakmurniannya, terutama oleh Fe, Cu, Ni, dsb, yang memberikan semua pengaruhnya walaupun dalam kadar yang rendah yaitu 0,01–0,05%Fe, 0,001–0,002% Cu dan 0,000–0,001%Ni, untuk menghindari pengaruh buruk dari ketakmurnian, maka dibuat ingot murni dengan jalan destilasi sehingga didapat Mg yang tahan korosi.

Dalam produksi paduan coran yang pejal dengan penghalusan butir kristalnya secara sempurna yang memberikan jaminan pada sifat kedap tekannya, dimungkinkan dengan mencampurkan Zr. Dengan menambahkan unsur Ce atau logan tanah

Tabel 2.30 Kemurnian logam magnesium.

Proses pembuatan	Mg (wt %)	Ketakmurnian										
		Al	Mn	Si	Cu	Ni	Fe	Ca	Pb	Zn	Ag	Na
Elektrolisa	99,85	0,01	0,08	0,01	0,003	0,001	0,03	<0,01	<0,001	<0,01	—	—
Proses Pidgion	99,978	0,004	0,002	0,006	<0,001	<0,0005	0,001	—	0,001	0,001	<0,0005	0,001

jarang seperti Th, maka sekarang dapat dibuat Mg yang tahan panas dan tahan melar pada temperatur tinggi.

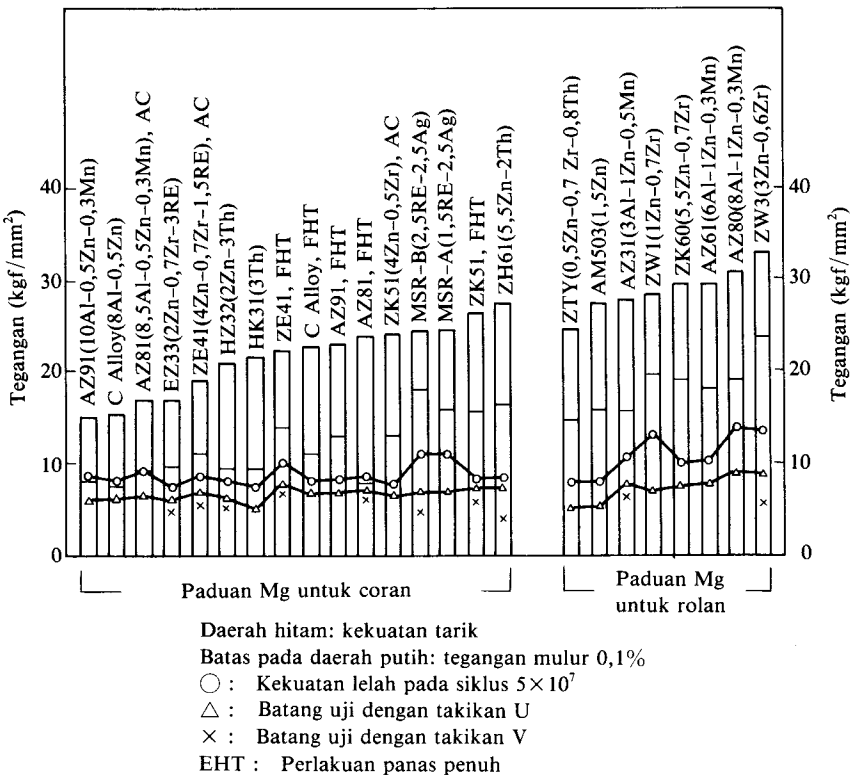
5.2 Sifat-sifat magnesium dan paduannya.

Mg berkristal heksagonal susunan rapat (*cph*) dan mempunyai kekuatan tarik 19,0 kgf/mm^2 setelah penganilan, kekuatan mulur 9,8 kgf/mm^2 dan perpanjangannya 16%, kira-kira 2–3 kali lebih kuat dari Al. Bidang gesernya pada temperatur biasa terbatas pada bidang {0 0 0 1}, karena itu getas, tetapi pada temperatur 200°C atau lebih terjadi bidang geser {1 0 $\bar{1}$ 1} (bidang piramid) dan bidang geser {1 0 $\bar{1}$ 0} (bidang prisma), hal ini membuat logam lebih liat dan lebih mudah diolah pada temperatur tinggi.

Adalah berguna dan penting untuk memilih unsur paduan yang diketahui memberikan pengaruh terhadap magnesium. Al memberikan pengaruh efektif untuk menghaluskan struktur coran, yang memungkinkan untuk diadakan perlakuan panas. Tetapi aluminium menyebabkan kekeroposan dan segregasi. Mn lebih berguna untuk memperbaiki ketahanan korosi dari pada sifat-sifat mekanisnya. Zn memperbaiki kekuatan dan menghaluskan kristal, juga memungkinkan perlakuan panas. Akan tetapi tanpa disertai oleh Zr mengakibatkan agak getas dan mudah terjadi kekeroposan mikro. Zr memberikan pengaruh yang efektif dalam penghalusan ukuran butir dan membuat coran pejal. Penambahan Be yang kecil menghindari oksidasi pada cairan, tetapi dalam paduan Mg–Al dan Mg–Zr membuat kristal kasar pada coran. Penambahan unsur logam jarang (RE) memberikan pengaruh efektif pada kekuatan melar untuk waktu yang lama sampai 250°C. Tetapi, tanpa penghalusan butir dengan menambah Zr diharapkan kurang terjadi perbaikan terhadap sifat-sifat mekanisnya. Th memberikan pengaruh efektif terhadap kekuatan melar untuk waktu yang lama sampai kira-kira 350°C menghambat terbentuknya kekeroposan mikro dan kegetasan yang disebabkan pemaduan Zn, dan memperbaiki keuletan. Ag memberikan kemampuan untuk perlakuan panas dengan batas larutan padat yang tinggi, tetapi suatu peningkatan pengaruh perlakuan panas yang legkap tidak dapat diharapkan tanpa disertai adanya unsur logam tanah jarang (RE). Si pada mulanya diperkirakan merupakan unsur pengotor, tetapi sekarang ditemukan berguna untuk menghaluskan butir, walaupun perbaikan terhadap sifat-sifat mekaniknya tidak banyak diketahui sebelumnya.

5.2.1 Paduan Mg untuk coran

Gb. 2.60 menunjukkan kekuatan tarik, kekuatan mulur dan kelelahan dari paduan magnesium. Paduan yang ditambah Zr memberikan coran yang pejal, seperti RZ5 (Inggris), ZE41 (Amerika Serikat) dengan komposisi 4,25%Zn–1,25%RE–0,50% Zr, mempunyai mampu las yang baik, merupakan paduan yang berguna walaupun sifat-sifat mekaniknya tidak begitu baik, yang memerlukan perlakuan panas cukup. MSR (Inggris), dengan komposisi 0,7%Zr–1,5%RE (mungkin juga mengandung 2,5%Ag), mempunyai sifat-sifat mekanis yang baik. ZREl dengan 1,9%Zn–0,7%Zr–3,25%RE, ZTl dengan 2,1%Zn–0,7%Zr–3,0%Th, dst, adalah baik untuk pemakaian yang lama pada temperatur kira-kira 250°C. Untuk pengecoran cetak sering dipergunakan AZ91, 9,8%Al–0,7%Zr.



Daerah hitam: kekuatan tarik
Batas pada daerah putih: tegangan mulur 0,1%
○ : Kekuatan lelah pada siklus 5×10^7
△ : Batang uji dengan takikan U
× : Batang uji dengan takikan V
EHT : Perlakuan panas penuh

Gb. 2.60 Kekuatan tarik, tegangan mulur dan kekuatan lelah paduan magnesium.

5.2.2 Paduan Mg tempaan

Gb. 2.60 juga menunjukkan sifat-sifat mekanik dari paduan Mg. AZ31 dengan 3%Al-1%Zn-0,4%Mn, adalah paduan yang mempunyai keliatan dan kekuatan yang baik, menyatakan bahwa paduan dapat dipakai pada temperatur biasa. Paduan AZ61, dengan 6%Al-1%Zn-0,3%Mn, mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dari pada AZ31 itu bertahan kekuatannya pada kira-kira 10 kgf/mm^2 pada 200°C. ZK60, dengan 5,5%Zn-0,7%Zr, adalah paduan yang berkekuatan tinggi dengan pengasaran butir yang kurang selama penganilan dan pengerjaan panas, oleh karena itu dipakai untuk bahan yang perlu dibebani tegangan tinggi seperti pada pesawat terbang, dipakai pada atau di bawah 150°C. Sebagai tambahan dipakai juga ZW3 dengan 3% Zn-0,6%Zr, dan ZW1 dengan 1%Zn-0,7%Zr.

5.2.3 Paduan tempaan temperatur tinggi

Paduan ZTX (AZ31), dengan 2,7%Th-1,0%Zn-0,6%Zr, adalah bahan yang khas yang mampu mempertahankan tegangan mulurnya kira-kira 10 kgf/mm^2, pada temperatur setinggi 300°C. Di samping itu paduan ZTV (HZ11) dengan 0,75%Th-0,5%Zn-0,6%Zr, paduan HM20 dengan 2,0%Th−1,0%Mn, paduan HM31 dengan 3,0%Th-1,0%Mn, dsb, telah ada di pasaran.

6 LOGAM-LOGAM LAIN DAN PADUANNYA

6.1 Titanium dan paduannya

Bijih yang mengandung titanium dan gas Cl_2 direaksikan pada temperatur tinggi menghasilkan $TiCl_4$ kemudian direduksi oleh Mg mengahasilkan titanium spons, kemudian dicairkan di tanur busur listrik di dalam vakum atau dengan lingkungan gas mulia untuk membuat titanium ingot. Selanjutnya ingot ditempa pada temperatur 800–1000°C dan dirol pada 700–800°C dibuat menjadi bahan yang akan dikerjakan selanjutnya.

Titanium mempunyai titik cair yang tinggi yaitu 1668°C, dengan titik transformasi pada 882°C dari α Ti (*hcp*)$\rightleftarrows\beta$ Ti (*bcc*), α ada pada temperatur rendah. Berat jenisnya adalah 4,54 kira-kira 60% dari baja. Titanium mempunyai ketahanan korosi sangat baik, hampir serupa dengan ketahanan korosi baja tahan karat. Titanium sendiri merupakan suatu logam yang aktif, tetapi titanium membentuk lapisan pelindung yang halus pada permukaannya, yang mencegah berlanjutnya korosi ke dalam. Kalau titanium dipanaskan di udara terjadi lapisan kulit TiO, Ti_2O dan TiO_2, sedang hidrogen yang terbentuk dari uap air di udara diabsorb oleh titanium. Selanjutnya O dan N, juga diabsorb oleh titanium, yang menyebabkan titanium keras. Oleh karena itu titanium menjadi getas kalau dipanaskan pada atau di atas 700°C, selalu harus berhati-hati kalau memanaskan titanium di udara.

6.1.1 Perlakuan panas paduan titanium

Dilihat dari struktur mikronya paduan titanium terbagi atas fasa α, fasa $\alpha+\beta$ dan fasa β. Kepada fasa β tidak dapat diadakan perlakuan panas sedangkan pada fasa $\alpha+\beta$ dan fasa β dapat diadakan perlakuan panas.

Paduan fasa α terutama mengandung Al dan Sn yang berguna setelah pelunakan atau penganilan dan penghilangan tegangan.

Paduan titanium dapat membentuk martensit dan fasa α' dengan pendinginan cepat dari fasa β, tetapi tidak begitu keras, yang memberikan sedikit pengaruh terhadap sifat-sifat mekanis. Pada paduan fasa $\alpha+\beta$ kalau fasa β lebih banyak, yang didinginkan pada air setelah dipanaskan sampai fasa $\alpha+\beta$ maka $\alpha+\beta$ merupakan struktur yang berbentuk bulat. Fasa β yang terbentuk, merupakan fasa yang metastabil, tidak langsung terurai menjadi fasa $\alpha+\beta$ tetapi melalui suatu fasa antara yaitu fasa ω, yang mempunyai sifat keras dan getas, presipitasi harus dihindari dalam hal ini. Biasanya dipanaskan lebih tinggi dari temperatur presipitasi ω yang kemudian terurai menjadi fasa $\alpha+\beta$ yang halus. Kalau fasa α lebih banyak perlu dicelup dingin dari fasa β untuk mendapat $\alpha'+\beta$ yang kemudian harus dipanaskan kembali untuk mendapatkan fasa β menjadi struktur $\alpha+\beta$ yang halus. Paduan fasa β dapat berubah menjadi martensit karena pencelupan dingin, dan fasa β yang tersisa dipanaskan ke

temperatur yang lebih tinggi dari pada temperatur presipitasi fasa ω untuk membuat presipitasi fasa α yang halus. Tabel 2.31 menunjukkan perlakuan panas dan sifat-sifat mekanis dari paduan titanium.

6.1.2 Paduan titanium fasa α

Tabel 2.32 menunjukkan sifat tarikan dari titanium dalam tiga kelas yang murni tehnis. Sifat-sifatnya berubah banyak menurut kemurniannya, atau walaupun kemurniannya sama sifatnya berubah karena mengandung ketakmurnian tertentu. Pada temperatur transformasi yang rendah di bawah-100°C kembaran yang terdeformasi muncul di sekitar permukaan patah, tetapi bentuk gerigi yang jelas muncul pada kurva tegangan-regangan hanya pada 4°K. Patahan getas tidak pernah terjadi.

Paduan Ti-5%Al-2,5%Sn adalah paduan fasa α yang khas yang mempunyai keuletan cukup dan mampu las yang baik. Sampai kira-kira 500°C mempunyai kekuatan melar yang tinggi. Paduan-paduan yang terutama mempunyai larutan padat interstisi rendah dari atom C, N, O. dsb, adalah baik dipakai sebagai komponen-komponen mesin, dalam penggunaan khusus kriogenik, kekuatan tinggi dan keuletannya dapat bertahan sampai-253°C.

Paduan Ti-8%Al-1%Mo-1%V telah dikembangkan untuk penggunaan temperatur tinggi, yang dapat bertahan secara baik pada temperatur tinggi baik kekuatannya maupun kekuatan melarnya, dalam hal itu paduan ini merupakan paduan terbaik di antara paduan fasa α dan fasa $\alpha+\beta$. Oleh karena itu dengan proses penganilan dua tahap, keuletan pada temperatur rendah dapat diperbaiki.

6.1.3 Titanium fasa $\alpha+\beta$

Paduan Ti-6%Al-4%V adalah paduan tipikal dari jenis fasa $\alpha+\beta$ yang banyak dipergunakan. Yang mempunyai kekuatan pada temperatur tinggi, tetapi di bawah-150°C keuletannya akan menurun. Paduan Ti-4%Al-3%Mo-1%V adalah juga paduan yang banyak dipergunakan. Paduan ini sangat baik kekuatan dan mampu bentuknya.

6.1.4 Paduan titanium fasa β

Paduan Ti-13%V-11%Cr-3%Al adalah salah satu dari paduan fasa β. Kekuatan yang tinggi dan perbandingan batas mulurnya bertahan sampai kira-kira 400°C. Dilihat dari kekuatan spesifiknya, paduan ini lebih baik pada daerah temperatur tersebut dibandingkan dengan baja 4340 (Ni-Cr-Mo), baja tahan karat dan paduan aluminium.

Seperti telah dikemukakan di atas paduan titanium mempunyai kekuatan yang lebih baik dan juga ketahanan korosinya tetapi mahal. Paduan titanium hanya dipergunakan terutama untuk pesawat terbang.

6.2 Nikel dan paduannya

Nikel terutama dibuat dengan secara elektrolisa, tetapi yang dinamakan nikel Mond dalam bentuk pelet dihasilkan dengan jalan pirolisa dari nikel karbonil. Ni adalah logam yang berwarna perak keabu-abuan mempunyai sel satuan kubus berpusat muka (*fcc*) dengan masa jenis 8,7, hampir sama dengan Cu. Setelah penganilan kekuatan tariknya 45-55 kgf/mm^2, perpanjangannya 40-50%, dan kekerasannya 80-

Tabel 2.31 Perlakuan panas dan sifat tarikan pada temperatur paduan titanium.

Paduan		Kondisi perlakuan panas	Bentuk	Sifat-sifat tarikan		
Fasa	Komponen (%)			Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Batas mulur 0,2% (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)
α	5Al-2,5Sn	Dianil (719°C, jam, AC)	Lembaran tipis	87,5	84,0	18
α	6Al-2Nb-1Ta	Dianil (899°C, jam, AC)	Batang	88,2	84,0	17
α	6Al-1Mo-1V	Perlakuan panas (982°C, jam, AC + 593°C, 8 jam, AC)	Lembaran tipis	102,9	94,5	16
$\alpha+\beta$	6Al-4V	Dianil (760°C, 2 jam, AC) Perlakuan panas (927°C, 20 menit WC + 524°C, 8 jam, AC)	Lembaran tipis	94,5 119,0	84,5 105,0	11 7
$\alpha+\beta$	4Al-3Mo-1V	Perlakuan panas (885°C, 2,5 menit WC) Perlakuan panas (885°C, 2,5 menit WC + 496°C, 8 jam, AC)	Lembaran tipis	98,0 136,5	66,5 116,9	15 6
$\alpha+\beta$	7Al-4Mo	Dianil Perlakuan panas (899°C, 20 menit WC + 482°C, 16 jam, AC)	Batang	112,0 133,0	105,0 122,5	15 12
$\alpha+\beta$	8Mo	Dianil (704°C, 1 jam, FC)	Lembaran tipis	96,6	87,5	15
β	13V-11Cr-3Al (B120V CA)	Perlakuan panas (760–815°C, 15–30 menit, AC) Perlakuan panas (760°C, 30 menit, AC + 482°C, 16 jam, AC)	Lembaran tipis	94,5 126,0	91,0 119,0	16 6

Catatan: AC-Pendinginan udara, FC-Pendinginan tungku, WC: Pendinginan air

Tabel 2.32 Sifat-sifat tarikan logam titanium (Berbada karena kemurnian)

	Keadaan	Temperatur biasa			600°C			Mampu bentuk radius minimum (MT)*
		Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Batas mulur (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Batas mulur (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	
Kelas teknis								
(99,2%)	Dianil	41,5	28,1	28	19,7	9,1	—	1,5–2t
(99,0%)	〃	55,6	44,3	27	23,2	13,6	33	2–2,5t
(99,0%)	〃	66,8	56,3	25	30,2	19,0	28	2,5–3,5t

*Ketebalan ganda

90 Brinell. Ni baik sekali dalam ketahanan panas dan ketahanan korosinya, tidak rusak oleh air kali atau air laut dan alkali. Tetapi bisa rusak oleh asam nitrat dan sedikit tahan korosi terhadap asam khlor dan asam sulfat.

Seperti telah dikemukakan di atas Ni dipergunakan sebagai unsur paduan untuk baja, paduan tembaga, dan paduan nikel tahan panas. Nikel sendiri dibuat dalam bentuk pelat tipis batangan pendek, pipa dan kawat, yang dipakai untuk pembuatan tabung elektron dan penggunaan dalam industri makanan. Juga dipakai untuk paduan Ni khusus yang dinamakan kupronikel untuk pembuatan uang logam.

6.2.1 Paduan Ni-Cu

Paduan Cu-10-30%Ni dinamakan tembaga putih atau kupronikel. Paduan Ni-Cu mengandung kira-kira 67%Ni dinamakan logam monel, yang didapat dari pemurnian langsung dari bijih, yaitu suatu paduan alamiah. Kedua paduan tersebut mempunyai kekuatan dan ketahanan korosi yang baik yang dipergunakan untuk komponen-komponen khusus dari kondensor, komponen-komponen pompa, motor-motor, dsb. Paduan Cu-Ni yang mengandung 45%Ni mempunyai tahanan listrik yang tinggi dan koefisien pemuaian yang rendah, paduan itu dinamakan konstantan, dipergunakan sebagai kabel tahanan dan termokopel.

6.2.2 Paduan Ni-Cr

Paduan yang terdiri dari 20%Cr dan 80%Ni dinamakan nikhrom dan sejak lama telah dipergunakan untuk kawat pemanas listrik. Satu seri dari paduan tahan panas dinamakan nimonik, inkonel, terutama terdiri dari komponen-komponen ini yang telah diutarakan di atas.

6.3 Seng dan paduannya

Seng adalah logam yang kedua setelah Cu yang diproduksi secara besar sebagai logam bukan besi. Kekuatannya rendah, tetapi titik cairnya juga rendah 419°C dan hampir tidak rusak di udara biasa, yang dipergunakan untuk pelapisan pada besi. Juga dipergunakan sebagai bahan pelat batere kering dan untuk keperluan percetakan.

Paduan 4%Al-1%Cu-Mg-Zn terutama dipergunakan untuk pengecoran cetak. Dengan paduan ini dapat menghasilkan paduan coran berbentuk rumit, yang umumnya dipakai untuk penggunaan yang praktis dan perhiasan pada komponen mobil, perkakas listrik untuk dapur, pegangan untuk mesin-mesin kantor dsb.

6.4 Timbal dan paduannya

Timbal mempunyai masa jenis yang tinggi yaitu 11,36, titik cair yang rendah dan mempunyai ketahanan tinggi terhadap asam, baik untuk menahan sinar radioktif. Paduan untuk pelapis kabel mengandung 1% dari As, Ca, Sb, dsb, adalah paduan yang sangat terkenal. Di samping itu dengan mempergunakan titik cairnya yang rendah, logam ini dipakai untuk paduan solder lunak dsb.

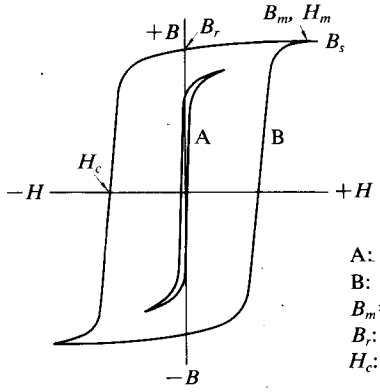
7.2 Bahan magnet

Bahan magnet dapat digolongkan menjadi dua yaitu yang lunak dan yang keras. Bahan magnet yang lunak dibuat agar mempunyai permeabiliti yang maksimum dan kerugian histerisis yang lebih rendah dan juga kerugian arus eddy yang rendah. Besi silikon adalah salah satu bahan magnet yang paling terkenal, dan sifat-sifatnya telah diperbaiki dengan menumbuhkan kristal pada arah kemagnetan yang mudah, Bahan ini mempunyai permeabilitas mula dan tahanan listrik lebih rendah, oleh karena itu kerugian arus eddy menjadi lebih besar pada daerah frekuensi audio. Pada titik ini paduan Fe-Ni adalah lebih unggul, dan sifat-sifatnya dapat diperbaiki dengan penganilan dalam medan magnet. Di dalam daerah frekuensi audio dipergunakan ferit dan di daerah frekuensi yang lebih tinggi umpamanya gelombang mikro dipergunakan garnet, keduanya adalah bahan yang mempunyai tahanan listrik tinggi dan kerugian eddy yang rendah. Bahan magnet yang keras dapat diwakili oleh paduan alnico dengan hasil inersi tinggi, yang dapat ditingkatkan lebih lanjut oleh perlakuan panas dalam medan magnet. Besi dengan domen magnet tunggal dianil dalam medan magnet dan magnet permanen terbuat dari Fe-Co bubuk dipadatkan dalam medan magnet mempunyai hasil energi tinggi.

7.2.1 Kurva pemagnetan

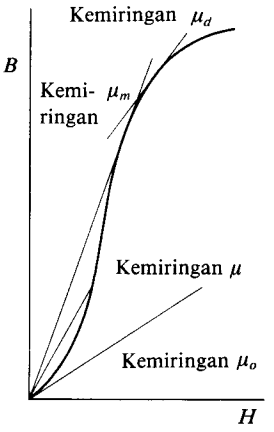
Berkenaan dengan bahan feromagnet pemagnetan jenuhnya tergantung pada sifat-sifat atomnya sendiri yang disebut momen atom, jadi pertama sebagai fungsi dari komposisi. Permeabilitas, gaya koersif dan bentuk umum dari kurva histerisis sangat peka terhadap struktur. Oleh karena itu sangat peka terhadp panas, zat-zat kimia, perlakuan mekanik dan magnet yang dilakukan sebelumnya terhadap bahan tersebut.

Gb. 2.63 menunjukkan kurva umum dari pemagnetan bahan feromagnet, sedangkan Gb. 2.64 menunjukkan tahap mula pemagnetan secara skematik. Kurva histerisis dari bahan magnet adalah sesuatu yang penting dalam penggunaannya yang luas. Penggunaan bahan inti untuk transformer, motor, mesin induksi dan generator listrik adalah sangat populer. Dalam penggunaan ini, bahan feromagnet tersebut dapat memberikan energi bulk kalau fluks magnet mudah diperbesar dengan pemagnetan oleh fluks magnet jenuh yang lebih besar. Tetapi disebabkan oleh



A: Bahan magnet lunak
B: Bahan magnet keras
$B_m = B_s$: Induksi jenuh
B_r: Pemagnetan sisa
H_c: Gaya *coercive*

Gb. 2.63 Kurva pemagnetan dari bahan feromagnet. Hubungan antara kuat medan magnet (H) dan induksi magnet (B).



μ: permeabilitas
μ_o: permeabilitas awal
μ_m: permeabilitas maksimum
μ_d: permeabilitas diferensial ($\mu_d = \Delta B/\Delta H$)
μ_s: permeabilitas relatip
(Perbandingan μ/μ_0 dengan permeabilitas dalam vakum $= \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, μ_{so}, μ_{sm} dsb).

Gb. 2.64 Bagian awal dari kurva pemagnetan.

kerugian histerisis sebagian dari energi dipergunakan. Pemagnetan bahan feromagnet dilakukan dengan transmisi batas domen magnet, yaitu dinding domen magnet, jadi kerugian histerisis adalah penggunaan dinding domen magnet dalam gerak maju mundur. Suatu domen magnet jauh lebih kecil dari ukuran butir, tetapi lebih besar dari sel satuan. Sifat-sifat yang diinginkan untuk bahan magnet lunak adalah fluks histerisis sekecil mungkin dan permeabilitas serta pemagnetan jenuh sebesar mungkin.

Kerugian lain dari arus bolak-balik disebabkan oleh hukum Faraday. Yaitu bahwa dengan medan magnet yang berubah, arus eddy terinduksi ke dalam inti badan magnet, dan pemakai energi karena panas Joule adalah tahanan listrik. Untuk mengurangi kerugian energi tsb tidak ada jalan lain kecuali meningkatkan tahanan listrik dari bahan inti dan mengurangi arus listrik terinduksi. Sebenarnya tidak selalu mungkin meningkatkan tahanan listrik tanpa mengurangi kerugian histerisis. Hanya satu jalan yang mungkin yaitu mengurangi arus listrik dengan mempergunakan lapisan-lapisan atau bahan bubuk. Di dalam daerah frekuensi untuk sumber listrik, dipergunakan pelat tipis besi silicon dibuat setipis mungkin diisolasi, di daerah frekuensi audio depergunakan paduan Ni–Fe (*permaloy*) yang mempunyai tahanan listrik lebih besar, dan di daerah lebih tinggi dipergunakan ferit dengan tahanan listrik yang lebih besar.

Tetapi untuk keperluan tertentu sering diinginkan penggunaan bahan dengan luas fluks histerisis yang lebih besar. Sebagai contoh bahan yang dipergunakan untuk magnet permanent memerlukan pemagnetan jenuh yang tinggi dan tahanan magnet yang besar.

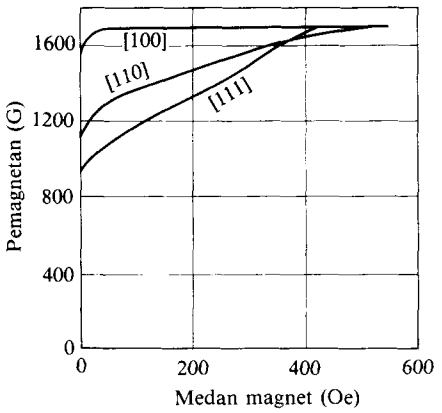
7.2.2 Besi silikon

Dalam abad ini besi silikon telah menggantikan penggunaan inti besi yang terbuat dari karbon biasa, yang dapat mengurangi kerugian tenaga listrik sampai sepertiga. Dengan memadukan silikon pada besi, tahanan listrik menjadi lebih besar sehingga mengurangi kerugian yang disebabkan arus eddy dan memungkinkan memperkecil kerugian histerisis.

Kalau silikon dipadukan dengan besi maka mampu bentuk besi menjadi buruk. Pada waktu pencairan, S, P, N, C, O, dsb, dihilangkan, selanjutnya bahan yang sudah dirol diadakan perlakuan panas dalam hidrogen basah dilanjutkan dengan perlakuan panas dalam hidrogen kering, yang memungkinkan menghilangkan sisa C

dan O dan membuat permeabilitasnya lebih tinggi. Kalau Si dipadukan, austenit akan hilang dengan penambahan kira-kira 3%, dan akan menjadi besi α di semua daerah temperatur, tahanan listriknya menjadi 7 kali lebih besar dari pada besi murni (pada 5%) dan pada 7% magnetostriksi menjadi nol. Makin tinggi kadar Si, makin baik sifat magnetnya, tetapi bertentangan dengan itu menjadi sukar dirol, jadi paduan sampai 4% mempunyai orientasi sebarang dan paduan sampai 3,2% mempunyai butir-butir mengarah.

Dengan pengontrolan yang teliti dalam pengerolan dan pengolahan panas besi silikon, maka dapat dihasilkan permeabilitas yang tinggi. Gb. 2.65 menunjukkan kurva pemagnetan dalam arah kristalografi utama dari besi murni kristal tunggal. Ditunjukkan bahwa permeabilitas paling tinggi dalam arah [1 0 0] dan paling jelek dalam arah [1 1 1].

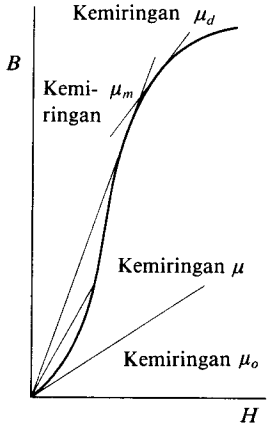


Gb. 2.65 Kurva pemagnetan dari besi kristal tunggal dalam arah aksial utama.

Ditunjukkan dalam Gb. 2.66 tiga macam besi silikon pelat tipis yang dihasilkan di industri yaitu (a) distribusi butir sebarang, (b) butir-butir dalam arah {1 0 0} searah terhadap arah pengerolan, bidang {1 1 0} sejajar pada bidang pengerolan dan (c) butir-butir dalam arah pengerolan dan butir-butir tegak lurus pengerolan keduanya dalam arah ⟨1 0 0⟩. Di (b) arah pengerolan mendekati arah pemagnetan yang mudah seperti ditunjukkan pada gambar terdahulu, dan di (c) kedua arah sejajar dan tegak lurus pengerolan mendekati arah pemagnetan mudah, jadi dengan mempergunakan inti besi sedemikian sehingga menyebabkan pemagnetan dalam arah seperti itu, memungkinkan untuk sangat memperkecil kerugian histerisis. Pelat tipis ini dinamakan besi silikon terarah dan menurut penemunya keterarahan yang disebut di (b) dinamakan orientasi Goss atau tekstur Goss, sedangkan sifat-sifat mengarah di (c) dinamakan orientasi ganda atau tekstur kubus. Sekarang besi silikon yang diorientasikan yang diproduksi secara industri dibuat dengan tekstur Goss, dan juga tekstur kubus telah berhasil diindustrikan, tetapi yang terakhir ini tidak diproduksi karena biayanya sangat tinggi.

7.2.3 Paduan Fe–Ni lunak

Peralatan komunikasi memerlukan kepekaan yang tinggi dan *kehalusan*, di mana besi silikon tidak cocok dipakai; maka paduan Fe–Ni sering dipergunakan. Tabel 2.33 menunjukkan perbandingan sifat-sifat antara besi, besi silikon dan tiga paduan Fe–Ni yang diperdagangkan. Permaloy dan Memetal menunjukkan permeabilitas mula yang tinggi dan kerugian histerisis yang rendah. Di samping itu pemagnetan jenuhnya rendah, yang merupakan suatu keburukan. Bahan tersebut cukup baik untuk



μ: permeabilitas
μ_o: permeabilitas awal
μ_m: permeabilitas maksimum
μ_d: permeabilitas diferensial ($\mu_d = \Delta B/\Delta H$)
μ_s: permeabilitas relatip
(Perbandingan μ/μ_0 dengan permeabilitas dalam vakum $= \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ H/m, μ_{so}, μ_{sm} dsb).

Gb. 2.64 Bagian awal dari kurva pemagnetan.

kerugian histerisis sebagian dari energi dipergunakan. Pemagnetan bahan feromagnet dilakukan dengan transmisi batas domen magnet, yaitu dinding domen magnet, jadi kerugian histerisis adalah penggunaan dinding domen magnet dalam gerak maju mundur. Suatu domen magnet jauh lebih kecil dari ukuran butir, tetapi lebih besar dari sel satuan. Sifat-sifat yang diinginkan untuk bahan magnet lunak adalah fluks histerisis sekecil mungkin dan permeabilitas serta pemagnetan jenuh sebesar mungkin.

Kerugian lain dari arus bolak-balik disebabkan oleh hukum Faraday. Yaitu bahwa dengan medan magnet yang berubah, arus eddy terinduksi ke dalam inti badan magnet, dan pemakai energi karena panas Joule adalah tahanan listrik. Untuk mengurangi kerugian energi tsb tidak ada jalan lain kecuali meningkatkan tahanan listrik dari bahan inti dan mengurangi arus listrik terinduksi. Sebenarnya tidak selalu mungkin meningkatkan tahanan listrik tanpa mengurangi kerugian histerisis. Hanya satu jalan yang mungkin yaitu mengurangi arus listrik dengan mempergunakan lapisan-lapisan atau bahan bubuk. Di dalam daerah frekuensi untuk sumber listrik, dipergunakan pelat tipis besi silicon dibuat setipis mungkin diisolasi, di daerah frekuensi audio depergunakan paduan Ni-Fe (*permaloy*) yang mempunyai tahanan listrik lebih besar, dan di daerah lebih tinggi dipergunakan ferit dengan tahanan listrik yang lebih besar.

Tetapi untuk keperluan tertentu sering diinginkan penggunaan bahan dengan luas fluks histerisis yang lebih besar. Sebagai contoh bahan yang dipergunakan untuk magnet permanent memerlukan pemagnetan jenuh yang tinggi dan tahanan magnet yang besar.

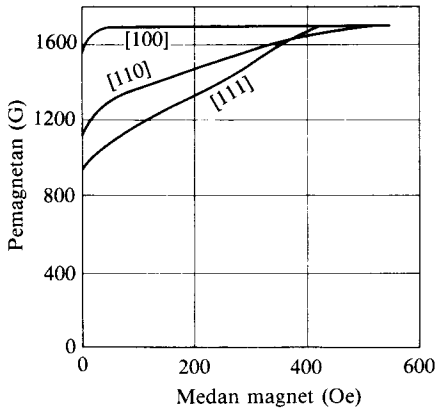
7.2.2 Besi silikon

Dalam abad ini besi silikon telah menggantikan penggunaan inti besi yang terbuat dari karbon biasa, yang dapat mengurangi kerugian tenaga listrik sampai sepertiga. Dengan memadukan silikon pada besi, tahanan listrik menjadi lebih besar sehingga mengurangi kerugian yang disebabkan arus eddy dan memungkinkan memperkecil kerugian histerisis.

Kalau silikon dipadukan dengan besi maka mampu bentuk besi menjadi buruk. Pada waktu pencairan, S, P, N, C, O, dsb, dihilangkan, selanjutnya bahan yang sudah dirol diadakan perlakuan panas dalam hidrogen basah dilanjutkan dengan perlakuan panas dalam hidrogen kering, yang memungkinkan menghilangkan sisa C

dan O dan membuat permeabilitasnya lebih tinggi. Kalau Si dipadukan, austenit akan hilang dengan penambahan kira-kira 3%, dan akan menjadi besi α di semua daerah temperatur, tahanan listriknya menjadi 7 kali lebih besar dari pada besi murni (pada 5%) dan pada 7% magnetostriksi menjadi nol. Makin tinggi kadar Si, makin baik sifat magnetnya, tetapi bertentangan dengan itu menjadi sukar dirol, jadi paduan sampai 4% mempunyai orientasi sebarang dan paduan sampai 3,2% mempunyai butir-butir mengarah.

Dengan pengontrolan yang teliti dalam pengerolan dan pengolahan panas besi silikon, maka dapat dihasilkan permeabilitas yang tinggi. Gb. 2.65 menunjukkan kurva pemagnetan dalam arah kristalografi utama dari besi murni kristal tunggal. Ditunjukkan bahwa permeabilitas paling tinggi dalam arah [1 0 0] dan paling jelek dalam arah [1 1 1].

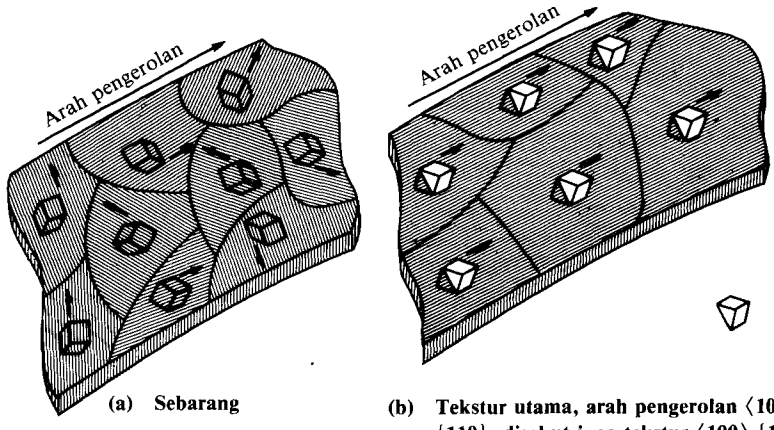


Gb. 2.65 Kurva pemagnetan dari besi kristal tunggal dalam arah aksial utama.

Ditunjukkan dalam Gb. 2.66 tiga macam besi silikon pelat tipis yang dihasilkan di industri yaitu (a) distribusi butir sebarang, (b) butir-butir dalam arah {1 0 0} searah terhadap arah pengerolan, bidang {1 1 0} sejajar pada bidang pengerolan dan (c) butir-butir dalam arah pengerolan dan butir-butir tegak lurus pengerolan keduanya dalam arah ⟨1 0 0⟩. Di (b) arah pengerolan mendekati arah pemagnetan yang mudah seperti ditunjukkan pada gambar terdahulu, dan di (c) kedua arah sejajar dan tegak lurus pengerolan mendekati arah pemagnetan mudah, jadi dengan mempergunakan inti besi sedemikian sehingga menyebabkan pemagnetan dalam arah seperti itu, memungkinkan untuk sangat memperkecil kerugian histerisis. Pelat tipis ini dinamakan besi silikon terarah dan menurut penemunya keterarahan yang disebut di (b) dinamakan orientasi Goss atau tekstur Goss, sedangkan sifat-sifat mengarah di (c) dinamakan orientasi ganda atau tekstur kubus. Sekarang besi silikon yang diorientasikan yang diproduksi secara industri dibuat dengan tekstur Goss, dan juga tekstur kubus telah berhasil diindustrikan, tetapi yang terakhir ini tidak diproduksi karena biayanya sangat tinggi.

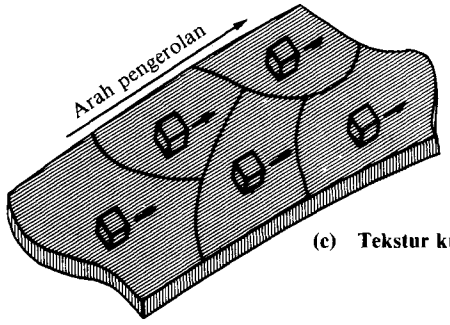
7.2.3 Paduan Fe–Ni lunak

Peralatan komunikasi memerlukan kepekaan yang tinggi dan *kehalusan*, di mana besi silikon tidak cocok dipakai; maka paduan Fe–Ni sering dipergunakan. Tabel 2.3? menunjukkan perbandingan sifat-sifat antara besi, besi silikon dan tiga paduan Fe–Ni yang diperdagangkan. Permaloy dan Memetal menunjukkan permeabilitas mula yang tinggi dan kerugian histerisis yang rendah. Di samping itu pemagnetan jenuhnya rendah, yang merupakan suatu keburukan. Bahan tersebut cukup baik untuk



(a) Sebarang

(b) Tekstur utama, arah pengerolan ⟨100⟩, bidang pengerolan {110}, disebut juga tekstur ⟨100⟩ {110}



(c) Tekstur kubus, arah pengerolan ⟨100⟩, bidang pengerolan {100}

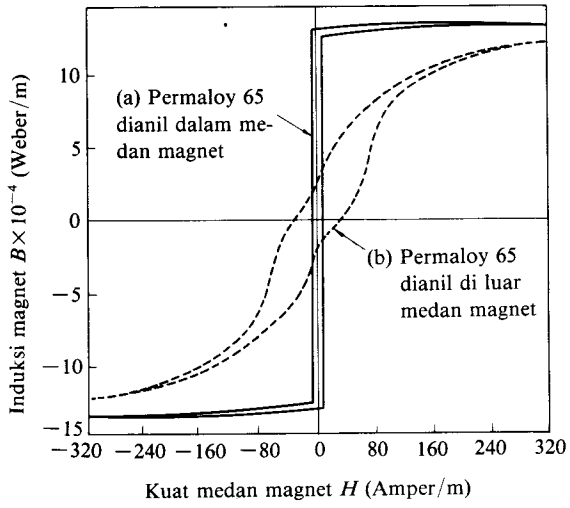
Gb. 2.66 Perbandingan butir yang mengarah dan sebarang pada lembaran tipis besi silikon kristal banyak. Kubus dalam gambar menunjukkan sel satuan besi α.

Tabel 2.33 Sifat kemagnitan utama dari bahan magnet lunak.

Bahan	Permeabilitas magnet relatip mula (μ_r at B-0)	Kerugian histerisis per siklus (joule/m^3)	Pemagnetan jenuh (weber/m^2)
Besi perdagangan	250	500	2,16
Fe-4%Si, sebarang	500	50-150	1,95
Fe-3%Si, tekstur	15.000	35-140	2,0
45 Permalloy (45%Ni-55%Fe)	2.700	120	1,6
Mumetal (75%Ni-5%Cu-2%Cr-18%Fe)	30.000	20	0,8
Paduan super (79%Ni-15%Fe-5%Mo-0,5%Ma)	100.000	2	0,79

dipergunakan sebagai bahan alat komunikasi dengan tenaga listrik yang kecil di daerah yang dapat didengar atau frekuensi yang rendah.

Permeabilitas mula paduan Fe-Ni peka terhadap pengolahan panas dan mekanis. Terutama terlihat sekali apabila kadar Ni 50-80%. Paduan tersebut apabila didinginkan perlahan-lahan dari 600°C atau di atas 400°C menunjukkan permeabilitas 1/2 nya dari paduan yang didinginkan cepat. Pada atau di bawah 500°C paduan tersebut mempunyai struktur teratur, dan permeabilitas yang lebih tinggi dapat diperoleh dengan pendinginan cepat kalau keteraturan terkendali. Pendinginan cepat dari 600°C di dalam medan magnet memungkinkan mendapat permeabilitas yang lebih tinggi. Hal ini disebabkan oleh unisotropi yang kuat dengan arah



Gb. 2.67 Pengaruh medan magnet pada lup histerisis dari permaloy 65%Ni (R. M. Bozorth).

pemagnetan yang mudah yang ditimbulkan dalam arah medan magnet. Gb. 2.67 menunjukkan pengaruh pendinginan medan magnet pada permaloy 65%Ni. Inti segi empat dari lup histerisis dapat memenuhi persyaratan komputer, amplifier magnet dan transduser pulsa.

7.2.4 Ferit lunak dan garnet

Dalam daerah frekuensi yang jauh lebih tinggi dipergunakan inti ferit, oksida yang ditekan dan disinter. Untuk transformer frekuensi tinggi dari TV dan pesawat penerima FM hampir mutlak harus mempergunakan inti ferit. Sebagai contoh salah satu yang dipakai terdiri dari (50%MgO, 50%MnO)-Fe_2O_3. Ferit Ni-Zn menunjukkan lup histerisis segi empat dengan penganilan dalam medan magnet.

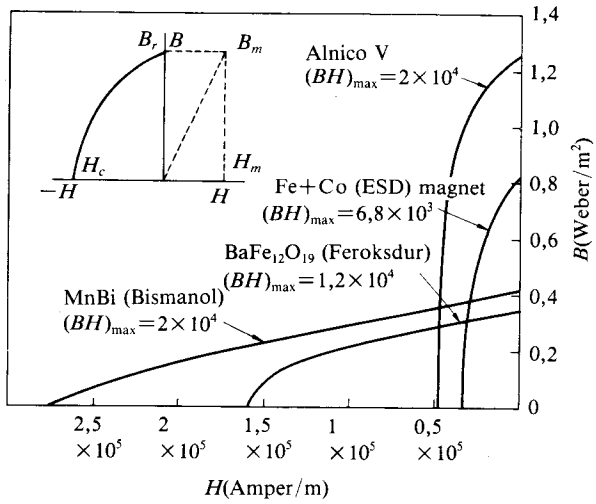
Dengan unsur tanah jurang seperti Sm, Eu, Gd, dsb, sebagai M, kristal dengan rumus umum $3M_2O$-$5Fe_2O_3$ disebut garnet, yang mempunyai harga tahanan besar dan kerugian histerisis yang sangat rendah di daerah gelombang mikro.

7.3 Bahan magnet keras

7.3.1 Bahan magnet permanen

Bahan dengan pemagnetan jenuh yang besar, magnet sisa, gaya *coercive*, dipergunakan sebagai magnet permanen. Gb. 2.68 menunjukkan bahan magnet permanen yang diperdagangkan diperbandingkan dalam kurva penghilangan pemagnetan.

Alnico V terdiri dari 14%Ni-24%Co-8%Al, 3%Cu-Fe, sering juga mengandung Ti. Feroksdur adalah bahan magnet keras dari ferit. Kegunaannya sebagai magnet permanen dengan anggapan disebabkan oleh energi magnet terhadap kuat fluks magnet. Energi potensial magnet terhadap pemagnetan adalah ditunjukkan dalam gambar. mengenai $B_rH_m/2$, dan energi magnet yang dapat dipakai ditunjukkan dengan daerah dilingkari oleh kurva penghilangan pemagnetan. Harga maksimum dari $B.H_-$ disebut hasil energi dari magnetnya. Umumnya energi yang dapat dipakai dari magnet tertentu kira-kira diberikan oleh volume magnet dikalikan dengan hasil energi.



Gb. 2.68 Kurva penghilangan magnet dari magnet permanen (R. M. Bozorth).

7.3.2 Bubuk halus dan bahan magnet film tipis

Bahan magnet keras sangat tahan terhadap gaya magnet dapat dibuat dengan merekatkan bubuk magnet yang halus lebih halus dari ukuran butir domain magnet. Bubuk halus terdiri dari satu domain magnet dihubungkan satu sama lain oleh resin atau logam yang non magnet, jadi perubahan pemagnetan disebabkan oleh perputaran domain magnet. Feroksdur seperti dikemukakan di atas dibuat dari ferit BaO dalam bentuk bubuk halus ditekan, disinter dan dianil dalam lingkungan medan magnet.

Pelat tipis dari Fe-Si, dan paduan Fe-Ni dengan sifat-sifat terarah adalah bahan untuk transformer frekuensi rendah. Dapat dipergunakan untuk frekuensi 20 kHz atau lebih tinggi apabila dibuat dalam bentuk pita yang tipis. Telah diketahui bahwa untuk frekuensi 1 MHz atau lebih tinggi ketebalan lapisan inti harus dibuat lebih tipis dari 10^{-5}m. Pita ini dipergunakan untuk komputer dan kontrol otomatik dari amplifier magnet. Film yang jauh lebih tipis dari 100 Å dari paduan Fe-Ni dibuat dengan jalan pelapisan hamburan dalam medan magnit, dan dipergunakan sebagi elemen penyimpanan magnitis.

Ferit juga dibuat menjadi pita dan film tipis, yang luas sekali penggunaannya.

8 LOGAM DAN PADUAN DIBUAT DENGAN TEKNIK METALURGI BUBUK

Teknik pembuatan bubuk logam atau bubuk paduan juga pembuatan barang-barang logam atau ingot logam dengan jalan menekan bubuk dalam cetakan dan kemudian disinter di bawah titik cairnya, dinamakan metalurgi bubuk. Dalam hal penekanan tidak perlu dan dapat ditiadakan, pada waktu penyinteran mungkin hanya sebagian bubuk campuran dapat menyatu. Selanjutnya penekanan dan pemanasan dapat dilakukan simultan, proses ini dinamakan penekanan panas. Banyak macam bubuk logam dapat dibeli termasuk senyawa logam dan sekarang tersedia oksida besi, oksida aluminium, oksida uranium demikian juga yang disebut ferit, perkakas keramik, cermet, bahan bakar nuklir dan sebagainya.

8.1 Keuntungan dan kerungian metalurgi bubuk

8.1.1 Keuntungan metalurgi bubuk

Metalurgi bubuk dipergunakan (1) bagi bahan yang tidak dapat atau sukar diproses dengan jalan mencairkan dan (2) bagi bahan yang memerlukan pemrosesan yang lebih murah dengan kualitas lebih baik. Keuntungan-keuntungan metalurgi bubuk dikemukakan di bawah ini.

(1) Penggunaan bagi bahan logam yang mempunyai titik cair tinggi

Tabel 2.34 menunjukkan titik cair dari logam yang bertitik cair tinggi. Sekarang pencairan dapat dilakukan sampai kira-kira 2.000°C. Temperatur 10.000°C sekarang dapat dicapai dengan proses busur plasma, proses busur hampa udara, proses jaras elektron dan sebagainya, tetapi belum ada bahan tahan panas (refraktori) yang tahan tidak meleleh atau tidak bereaksi pada temperatur itu. Selanjutnya proses pencairan menyebabkan butir lebih kasar dibandingkan dengan hasil proses metalurgi bubuk yang dalam beberapa hal menyebabkan tidak dapat dipakai.

Tabel 2.34 Logam dengan titik cair tinggi.

Logam	Titik cair K (°C)	Logam	Titik cair K (°C)
W	3.643 (3.370)	TiC	3.523 (3.250)
Cr_3C_2	2.168 (1.895)	WC	2.903 (2.630)
Mo	2.893 (2.620)	W_2C	3.003 (2.730)
Ta	3.269 (2.996)	TaC	4.153 (3.880)
SiC	2.973 (2.700)	NbC	3.773 (3.500)
HfC	4.163 (3.890)	VC	3.103 (2.830)
ZrC	3.448 (3.175)	Mo_2C	2.963 (2.690)

(2) Pembuatan logam murni

Dalam teknik metalurgi bubuk, bahan tidak dicairkan, ketakmurian dari krus atau dari penghilang oksida tidak pernah tercampur, dan kalau disinter dalam vakum atau dalam lingkungan pereduksi, tidak akan teroksidasi. Jadi kalau bahannya murni maka dapat dibuat produk yang murni.

(3) Ketelitian dan keseragaman dari perbandingan komposisi

Produk yang homogen mungkin dibuat, kalau setiap komponen yang dicampurkan telah dibubukkan dengan sempurna, karena tidak terjadi oksidasi, dan seluruh bagian tidak dicairkan meskipun terjadi sebagian pelarutan. Sisa penghilang oksida, perubahan perbandingan komposisi karena segregasi dan penguapan atau terjadinya kekeroposan, seperti sering terjadi pada hasil proses pencairan dan pembekuan, tidak pernah terjadi pada hasil proses metalurgi bubuk.

(4) Pembuatan produk yang dicampur dengan bahan bukan logam atau komponen yang tak campur dengan mencairkan

Kekhasan metalurgi bubuk adalah mampu membuat paduan C-Cu, atau W-Ag yang sukar dipadu, dan bahan komposit dari logam dengan SiO_2. ThO_2, dst.

(5) Bahan yang porus

Bahan porus hanya mungkin dibuat dengan metalurgi bubuk. Produk yang khusus ini ialah bantalan yang dapat menyimpan minyak pelumas, di mana minyak tersimpan dalam rongga bahan yang homogen.

(6) Pembuatan produk dari logam yang keras getas tak dapat ditempa

(7) Biaya murah

Dalam beberapa keadaan tertentu komponen dalam bentuk yang sama dapat dibuat lebih efisien dan lebih murah.

8.1.2 Kerugian pada teknik metalurgi bubuk

Kerugian metalurgi bubuk disebabkan oleh yang berasal dari bubuk logamnya sendiri dan yang berasal dari peralatan.

(1) Kerugian yang disebabkan bubuk logam

Kemurnian dan asal bubuk logam memberikan banyak pengaruh kepada kualitas produk akhir; yaitu bentuk bubuk, ukuran dan distribusinya merupakan faktor penting, akan tetapi tidaklah mudah mengendalikan keadaan-keadaan itu. Menurut sifat-sifat bubuk logam, kemampuan untuk ditekan berbeda-beda, dan besarnya tekanan dibatasi oleh kemampuan dan keadaan cetakan. Oleh karena itu ukuran dan bentuk akhir juga terbatas.

(2) Kerugian yang disebabkan peralatan

Pembatasan berasal dari alat pres, cetakan ekstrusi, tungku sinter, pengaduk dan sebagainya, yang terutama terjadi pada pembatasan daya tekanan, ukuran produk dan temperatur penyinteran. Sebagai ukuran produk, menjadi tidak ekonomis untuk ukuran 450-680 gram, dan sebagai temperatur penyinteran terbatas pada 1.100°C pada proses kontinu dan pada 1.400°C pada proses penyinteran tidak kontinu. Pembatasan tersebut telah diperbaiki dengan adanya pengembangan proses penekanan

panas mempergunakan cetakan grafit yang dapat menyinter sampai 2.000°C.

8.2 Bahan logam dengan titik cair tinggi

Dalam tahun 1910 Coolidge menemukan W yang disinter dari bentuk bubuk dapat ditempa pada temperatur tinggi dan menjadi ulet pada temperatur rendah, dan dipergunakan teknik yang sama pada pembuatan kawat pijar dari bola lampu listrik. Kejadian tersebut dikatakan lahirnya metalurgi bubuk yang modern. Di antara unsur logam yang mempunyai titik cair tertinggi adalah W diikuti oleh Mo, Ta, Zn, Re, dst.

8.2.1 W dan paduannya

Bubuk W direduksi oleh hidrogen dari oksidanya kemudian dipres menjadi batang, kemudian langsung dialiri arus listrik dan setelah penyinteran ditarik pada temperatur tinggi menjadi bentuk kawat. Selanjutnya kawat W didop dengan SiO_2 dan Al_2O_3 sehingga tegangan sisanya tinggal 0,05–0,065%.

Kawat W dipakai untuk kawat pijar lampu listrik dan lampu fluoresen, grid dari tabung elektron, kawat terbungkus gelas, dsb.

Paduan W–Mo kekuatannya kurang dibandingkan dengan W tetapi mempunyai mampu bentuk lebih baik dan keuletannya yang memuaskan. Sampai 50%Mo paduan ini biasa dipergunakan. Yaitu dipergunakan untuk pemanas katoda dari tabung elektron, termokopel dari tungku hidrogen, dsb. Selanjutnya dengan menambah Re pada W menyebabkan perbaikan yang menyolok pada keuletannya.

Kawat 3%Re–W dipakai sebagai kawat pijar dari lampu listrik dan paduan 30% Re dipakai untuk termokopel.

8.2.2 Paduan untuk kontak listrik

W–Ag dan W–Cu tidak pernah membuat paduan, tetapi dengan metalurgi bubuk dapat dibuat paduan dengan Ag dan Cu yang mempunyai hantaran listrik baik, dan dapat dibuat matriks yang mempunyai W terdistribusikan. Paduan di atas dan W–Cu–Ni dipergunakan sebagai bahan untuk kontak listrik.

8.2.3 Mo dan paduannya

Mo dapat dibuat dengan jalan yang serupa dengan pembuatan W. Pemaduan Mo telah dipelajari tetapi tidak dipergunakan secara praktis. Logam Mo mempunyai kekuatan tinggi pada temperatur tinggi, tetapi mempunyai tekanan uap tinggi pada temperatur tinggi. Mo tidak dipergunakan untuk keperluan yang terpanaskan sendiri tetapi hanya sebagai penahan dari kawat pijar, untuk target pada tabung sinar X, termokopel dan lain sebagainya.

8.3 Karbida sinteran dan perkakas cermet

Di antara unsur-unsur, C mempunyai titik cair yang paling tinggi, oleh karena itu karbida mempunyai titik cair yang tinggi dan kekerasan yang tinggi pula. Tabel 2.35 menunjukkan sifat-sifat karbida. Kecuali W titik cair karbida lebih tinggi dari titik cair unsur penyusunnya. Bahan untuk perkakas adalah baja kecepatan tinggi dan stelit, merupakan suatu paduan besi dan Co mengandung WC, Cr_3O_2, VC, dsb, seperti telah

Tabel 2.35 Sifat-sifat berbagai karbida.

Karbida	TaC	ZrC	NbC	TiC	WC	VC	Cr_3C_2
Titik cair (°C)	3.877	3.530	3.500	3.140	2.867	2.830	1.780
Titik didih (°C)	—	5.100	4.300	4.300	6.000	3.900	—
Masa jenis (g/cm^3)	14,48	6,80	7,85	4,92	15,50	5,36	6,68
Kekerasan (kg/mm^2)	1.800	2.600	2.400	3.200	2.400	2.800	1.300

ditunjukkan pada tabel di atas, tetapi karbida yang disinter dengan mempergunakan bubuk WC ditambah pengikat, mempunyai sifat-sifat yang lebih baik dari perkakas yang disebut di atas. Karbida yang sekarang dipakai adalah paduan dari WC-Co, WC-TiC-CO dan WC-TiC-Ta (Nb) C-Co. Sekarang di Amerika Serikat sering dipergunakan perkakas cermet dengan komposisi dasar TiC. TiC lebih keras dari pada WC dengan mampu mesin yang lebih baik, tetapi lebih getas. Yang lebih keras lagi adalah perkakas yang dibuat dari intan dan perkakas komposit intan.

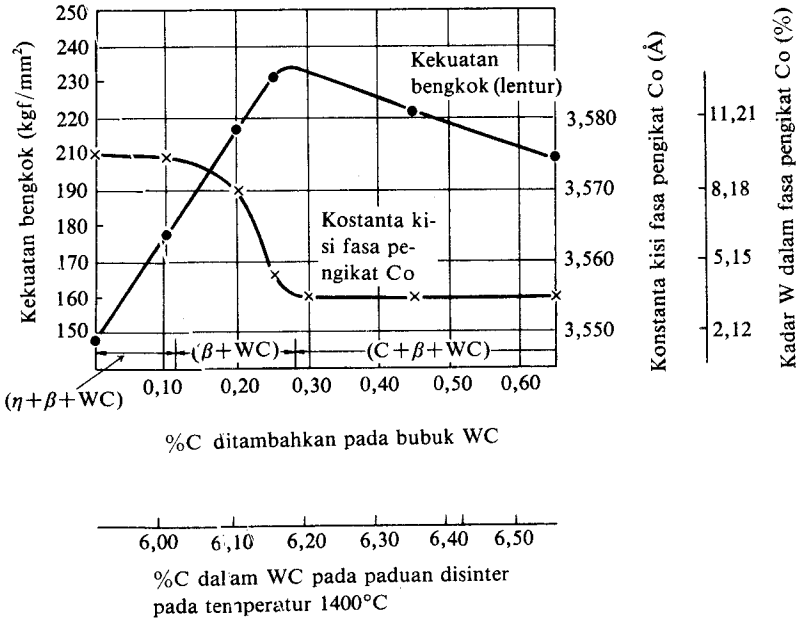
Sekarang perkakas keramik yang dibuat dari Al_2O_3 yang disinter telah juga dipakai di samping karbida. Al_2O_3 mempunyai titik cair 2.000°C, yang secara relatif rendah. Keuntungannya tidak memerlukan pengikat pada penyinteran. Selain bahan tersebut telah dikembangkan pula borida, nitrida dan silisida.

8.3.1 Paduan WC-Co

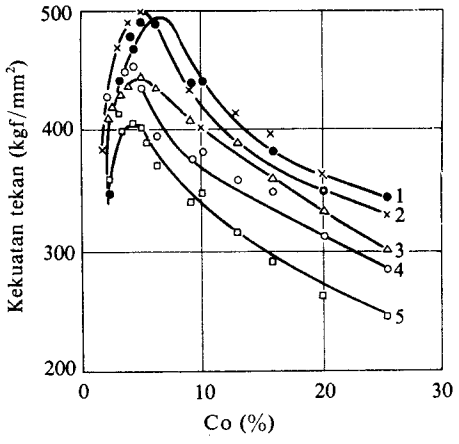
Struktur paduan WC-Co terdiri dari partikel WC yang merupakan kristal-kristal bersudut dan Co sebagai fasa dasar pengikat. Co biasanya ditambahkan antara 3-10%. Paduan ini terdiri dari WC+β (larutan padat dasar Co). Kalau C berlebihan terjadi karbon bebas atau grafit kalau C kurang terjadi presipitasi fasa η (W_3Co_3C atau W_2Co_4C). Makin rendah kadar Co, makin mudah terjadi presipitasi, oleh karena itu perlu berhati-hati agar tidak terjadi dalam hal kekurangan C. Gb. 2.69 menunjukkan perubahan kekuatan lentur dan konstanta kisi fasa dari spesimen yang terbuat dari bubuk WC dalam ukuran 1.3 μm (senyawa C: 6,10% karbon bebas: 0,15%) dan bubuk Co ukuran 2 μm (kadar oksigen: 0,6%) dengan bubuk karbon 0,65% dicampur dan disinter dalam vakum 1.400°C. W yang terkandung dalam fasa ini diperkirakan berada pada kisi fasa β. Dalam daerah dua fasa WC+β dengan jumlah C 6,00-6,20% (komponen WC adalah 6,12%C), karena meningkatnya C, W dalam fasa pengikat menjadi berkurang. Pada atau di bawah 6,00%C fasa η muncul dan pada atau di atas 6,22%C karbon bebas muncul. Kekuatan lentur menunjukkan harga maksimum sekitar batas kadar karbon tinggi (6,20%C) dari daerah dua fasa, dan sangat berkurang di daerah tiga fasa, dan kalau karbon bebas muncul akan berkurang lagi.

Dalam paduan WC-Co partikel WC umumnya disebut fasa α. Kalau WC berbutir halus 1-3 μm, butir tersebut dinamakan fasa α_1. Paduan WC-Co berupa fasa α_1 yang mempunyai kekerasan tinggi. Karena temperatur penyinteran tinggi dan waktu penyinterannya juga lama, akan terbentuk fasa α_1 yang berupa kristal bersudut dan kasar selama penyinteran. Ini dinamakan fasa α_2 yang kekerasannya rendah tetapi liat.

Kalau karbida yang disinter dipergunakan sebagai perkakas, maka kekuatan tekannya disangsikan. Gb. 2.70 menunjukkan pengaruh komposisi paduan dan diameter partikel WC pada kekuatan tekannya. Dalam kedua hal tersebut kekuatan tekannya menjadi maksimum pada 4-6%Co, dan dengan butir WC diameter 1,4-1,7 μm kekuatan tekan maksimumnya sampai 500 kgf/mm^2. Karena ukuran partikel bertambah dan kadar Co bertambah, pengurangan kekuatan tekan cukup besar.

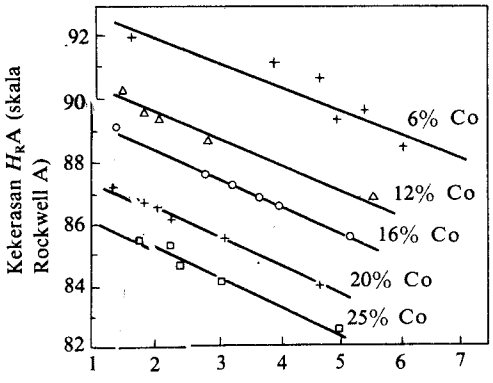


Gb. 2.69 Kekuatan lentur paduan WC+10%Co disinter pada 1400°C dan konstanta kisi (β) dari fasa pengikat Co (H. Suzuki dkk.: J. Jap. Soc. Metals *28* (1964) 55, *29* (1965) 467).



(Ukuran butir rata-rata dari WC, 1: 1,4 μm, 2:1,7 μm, 3: 1,9 μm. 4: 3,3 μ. dan 5: 5,3 μm)

Gb. 2.70 Pengaruh kadar Co pada kekuatan tekan dari paduan WC-Co (G. S. Kreimer dkk.: Fiz. Metal, i Metalloved *17* (1964) 572).



Gb. 2.71 Pengaruh ukuran butir WC pada kekerasan paduan WC-Co (J. Gurland dkk.: J. Metals *7* (1955), 311).

Dalam mengevaluasi sifa-sifat karbida yang disinter sering dipergunakan kekerasan skala Rockwell A. Gb. 2.71 menunjukkan pengaruh ukuran butir WC terhadap kekerasan paduan WC-Co. Kalau ukuran butir tertentu, karena meningkatnya kadar Co kekerasan berkurang secara linier.

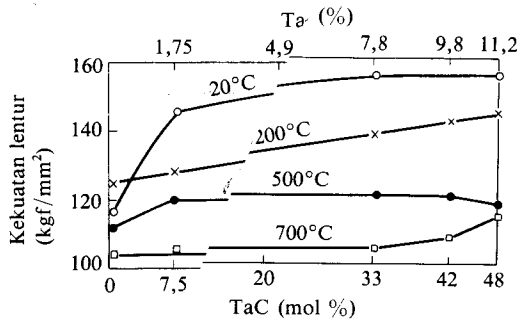
Penggunaan utama paduan WC-Co adalah untuk perkakas pemesinan.

Dipergunakan untuk pemotong yang disolder berbagai pemotong, rimer, gurdi, mata bor untuk pertambangan. Kalau kekerasan diperlukan, dipergunakan prosentase Co 3–10%. Di samping penggunaan tersebut dipakai juga untuk alat ukur, rol, komponen tahan aus, bola penggiling, dan penggunaan-penggunaan lainnya.

8.3.2 Paduan WC-TiC-Co dan paduan WC-TiC-TaC-Co

WC larut padat pada 72–75% dalam TiC, sedangkan TiC tidak larut dalam WC. Kalau larutan padat TiC-WC dinyatakan dengan (Ti.W)C, pada 75%WC atau lebih, ada dua fasa (Ti.W)C+WC, sedangkan Co merupakan fasa pengikat. Paduan (Ti.W)C-Co mempunyai kekerasan tinggi tetapi terlalu getas dan kekuatan lenturnya rendah. Menurut hasil pengujian paduan TiC/WC=15/79, di mana Co=4–25%, paduan (Ti.W)C-WC-Co pada 20%Co, kekuatan lenturnya mencapai 160 kgf/mm^2 dan dapat diperoleh paduan tanpa reduksi sampai kira-kira 500°C.

Kalau TaC ditambahkan pada paduan WC-TiC dapat diperoleh paduan yang mempunyai TiC dengan WC medium dan TaC yang larut padat, yang dinyatakan sebagai (Ti.Ta.W)C. Strukturnya sangat serupa dengan struktur paduan WC-TiC-Co. Gb. 2.72 menyatakan pengaruh kadar TaC terhadap kekuatan paduan WC-TiC-TaC-Co. Dengan penambahan TaC sebanyak 7.5% mol (1,75% berat) kekuatan lenturnya dapat mencapai 30 kgf/mm^2 atau lebih. Paduan WC-TiC-Co mempunyai keuletan yang lebih baik dan kekuatan temperatur tinggi lebih baik pula, oleh karena itu penggunaannya makin lama makin luas.



(Ti. Ta. W)C 22 vol%+56 vol%WC+13 vol%Co

Gb. 2.72 Pengaruh kadar TaC pada kekuatan lentur WC-TiC-TaC-Co paduan tiga fasa
(G. S. Kreimer: Strength of Hard Alloys Consultant Bur., N. Y. (1968), 148).

8.3.3 Cermet TiC

Kalau bubuk TiC disinterbersama bubuk Ni dan Co, bubuk logam dapat cair, jadi diperoleh paduan sinter. Bubuk TiC mula-mula disinter menjadi paduan dengan 30–35% keporusan, kemudian di atasnya diletakkan baja kecepatan tinggi, Ni dan Co, maka rongga-rongganya akan terisi pada temperatur tinggi. Paduan ini terutama dipakai sebagai bahan tahan temperatur tinggi untuk sudu turbin atau nozel motor jet.

Untuk perkakas dipergunaan TiC-(Ni+Mo), dsb. Kekerasannya lebih rendah dari pada bahan keramis denga dasar Al_2O_3 tetapi lebih tinggi dari pada kekerasan karbida WC yang disinter, dengan kekuatan lentur yang medium, oleh karena itu bahan ini dipakai sebagai mata ahat pemotong.

8.3.4 Perkakas dengan bahan dasar keramik Al_2O_3 dan paduan komposit intan

Secara lebih terperinci hal ini akan dikemukakan pada bab IV TiC lebih keras dari Al_2O_3, tetapi karena adanya fasa pengikat dalam TiC maka perkakas paduan dasar Al_2O_3 lebih keras. Intan adalah bahan yang paling keras di antara bahan yang ada di dunia, maka bubuk intan dikompositkan dengan berbagai bubuk logam melalui teknik metalurgi bubuk, dan dipakai untuk berbagai perkakas.

8.4 Komponen mesin yang disinter

Komponen mesin tertentu yang terbuat dari besi adalah komponen yang paling banyak dibuat dengan penyinteran. Hal ini merupakan kecenderungan untuk memperoleh sifat-sifatnya yang mendekati sifat baja dengan menambahkan C. Sifat khas metalurgi bubuk dimanfaatkan untuk menambahkan unsur paduan, umpamanya Cu dan P dapat ditambahkan walaupun hal ini dihindari pada pembuatan baja. Selanjutnya penggunaan komponen mesin yang disinter masih terbatas pada komponen berukuran kecil dan yang sangat presisi, tetapi karena perkembangan dalam teknik penempaan, komponen ukuran besar dengan kepadatan tinggi sedang dibuat, hal ini akan memperluas penggunaannya.

Komponen yang terbuat dari tembaga sinteran banyak juga dipergunakan, dalam urutan setelah besi sinteran. Baru-baru ini, juga paduan aluminium sudah dapat diperoleh. Selanjutnya, perkembangan teknik maju terus, satu perkembangan diikuti yang lainnya, sebagai contoh penggunaan baja kecepatan tinggi, paduan tahan panas, paduan komposit tahan panas dan seterusnya, maka metalurgi bubuk diharapkan akan menunjang banyak dalam pembuatan bahan baru.

8.4.1 Komponen mesin sinteran dari besi

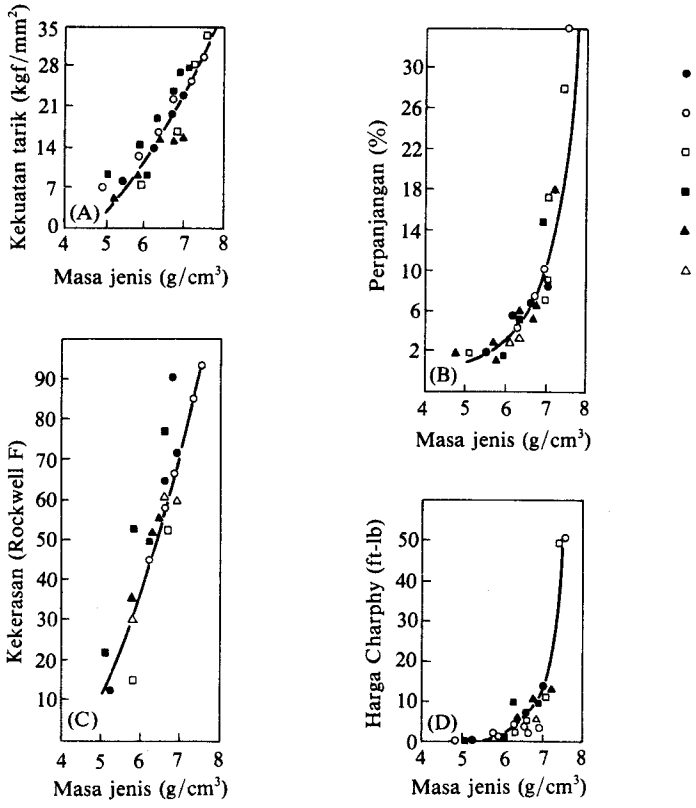
Sebagai bahan baku biasa dipakai bubuk besi yang dibuat dengan pereduksian karbon dari magnitit dan bubuk kerak gilingan, tetapi sekarang dipergunakan bubuk besi yang diatomkan yaitu, dibuat dari besi cair yang disemprotkan dan didinginkan dengan cepat, teknik ini memperluas permintaan akan bubuk.

Karena sifat proses pengatoman, dapat diperoleh dengan berbagai bubuk dari setiap komposisi kimia, maka daerah penggunaan metalurgi bubuk menjadi lebih luas.

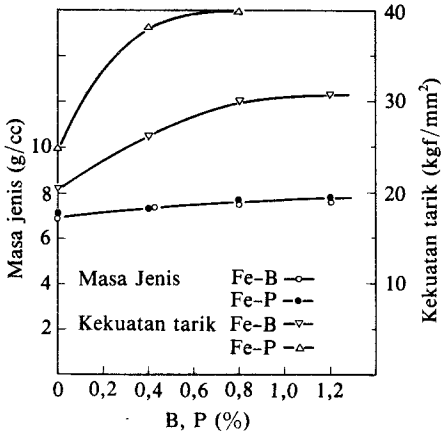
Bubuk besi yang sangat murni dapat diperoleh dengan proses elektrolisa, proses karbonil dan proses penguapan, yang masing-masing merupakan proses mahal sehingga penggunaannya terbatas pada penggunaan khusus seperti untuk bahan magnet.

Gb. 2.73 menunjukkan hubungan antara masa jenis sinteran dan sifat-sifat mekanik berbagai bubuk besi yang disinter pada 1.100°C selama satu jam dalam aliran hidrogen. Kekuatan tarik dan kekerasan meningkat sebanding lurus dengan masa jenis, dan perpanjangan serta harga impak menunjukkan hal yang serupa, meningkat cepat. Masa jenis sinteran yang biasa adalah kira-kira 6,8, kekuatan tariknya kira-kira 20 kgf/mm^2 dan perpanjangannya sekitar 8%.

Sedikit unsur bukan logam seperti B atau P ditambahkan masing-masing sekitar 1%, maka cairan eutektik Fe–B (3,8%B, 1.149°C) atau cairan eutektik Fe–P muncul secara terseleksi pada batas butir besi sebagai cairan yang mempercepat proses penyinteran. Gb. 2.74 menunjukkan hubungan antara kekuatan tarik, masa jenis dan jumlah unsur yang ditambahkan dari paduan yang disinter pada 1.200°C selama dua



Gb. 2.73 Masa jenis dari berbagai bubuk besi disinter dalam hidrogen pada 1100 °C untuk 1 jam dan sifat-sifat mekaniknya (○, ●, dsb, menunjukkan berbagai tipe dari sumber bubuk) (A. Squire: Tr. AIME *171* (1947), 485).



Gb. 2.74 Pengaruh penambahan B dan P pada masa jenis dan kekuatan tarik dari besi yang disinter (F. Benesousky: Planseeberichte f. P. M. 3 (1955) 57, P. Gummeson: Perpective in P. M. 3 (1968) 304 (Plenum Press)).

jam. Selain dari pada besi sinteran dipergunakan juga baja sinteran.

Baja karbon sinteran yang dipakai adalah Fe-Cu, Fe-Cu-C, Fe-Ni, Fe-Mo-Mn, Fe-Mn, Fe-Cr dan sebagainya: Sekarang baja kecepatan tinggi sinteran sedang menarik perhatian orang. Cara utamanya yaitu bubuk logam yang bersangkutan dicampur dan disinter, tetapi kadang-kadang baja paduan yang dibuat dengan proses pencairan dibubukkan dengan proses pengatoman dan kemudian disinter.

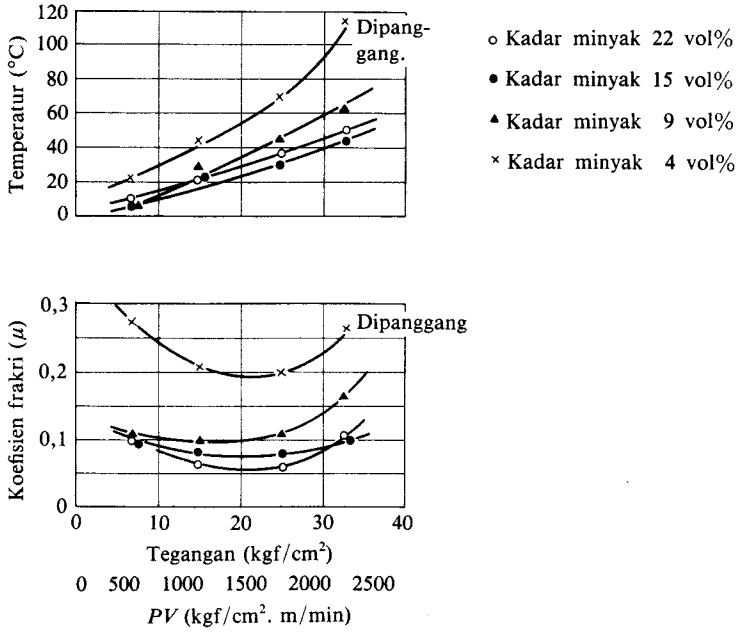
Kebanyakan komponen mesin yang disinter adalah besi. Tujuh puluh persen dari komponen mesin dari besi sinteran dipakai untuk komponen mobil kemudian untuk peralatan listrik rumah tangga, mesin kantor, instrumen optik, mesin jahit dan sebagainya.

Komponen besi sinteran kebanyakan dalam bentuk benda kecil seperti roda gigi, kam, mur, cincin, dll, sehingga jumlah komponen besar, tetapi presentase beratnya kecil. Sekarang mulai dilakukan penempaan, yang memungkinkan membuat komponen ukuran besar. Bagi baja paduan, kebanyakan ditambahkan Cu, tetapi bagi komponen masa jenis tinggi penambahan Ni lebih baik. Penambahan Mn dan Cr menguntungkan secara ekonomis dan diharapkan menghasilkan sifat-sifat baik, tetapi selama penyinteran harus berhati-hati terhadap oksidasi. Komponen sinteran dapat dibuat dengan memulai penyinteran pada temperatur rendah, agar tidak terjadi pengasaran butir ataupun segregasi, jadi diharapkan diperoleh efisiensi yang tinggi. Salah satu contoh yang menarik adalah sinteran baja kecepatan tinggi yang mempunyai keuletan lebih tinggi dari hasil proses pencairan, terutama pada penggunaan yang terhentihenti, makin sering terhenti makin panjang umur pakainya.

8.4.2 Komponen sinteran bukan besi

(1) Paduan tembaga

Paduan tembaga sinteran yang dibuat adalah Cu-Sn, Cu-Zn, Cu-Ni, Cu-Ni-Zn, Cu-Al, Cu-Pb dsb, yang terutama dipakai untuk bantalan yang mengandung minyak. Sebagai contoh pada Gb. 2.75 ditunjukkan hasil pengukuran sifat-sifat bantalan brons. Seperti tampak pada contoh tersebut, sifat bantalan dibandingkan dalam perkalian beban (P kg/cm^2) dengan kecepatan putar (V m/men)



Gb. 2.75 Hubungan antra kadar minyak dan sifat khas bantalan Cu-10%Sn yang disinter diisi minyak (Minyak yang dimasukkan: Mobil oil 30) (Watanabe, J. Japan Soc Mech., *63* (1960), 1614).

(2) Paduan aluminium sinteran

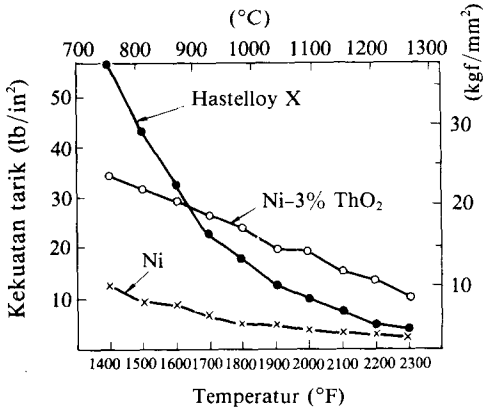
Al memiliki hantaran termal yang baik. Paduan Al-Cu dan Al-Cu-Si dipergunakan untuk bantalan peluru jenis yang dapat mengatur sendiri bagi motor-motor kecil. Bukan komposit Al-Al_2O_3 dibuat dengan memanfaatkan sifat bubuk Al yang mudah teroksidasi, yang disebut produk aluminium sinteran (SAP). Di antara paduan Al, kekuatan pada temperatur tinggi terlihat lebih unggul. Bahan ini dipergunakan untuk torak motor bakar, untuk penukar panas dan pelapis bagi bahan bakar padat dalam reaktor, dan lainnya.

8.4.3 Bahan komposit tahan panas

Diilhami oleh SAP, telah dilakukan sejumlah studi mengenai paduan yang diperkuat dispersi, di mana berbagai oksida halus yang stabil pada temperatur tinggi didistribusikan dalam matriks Cu dan Ni. Sebagai fasa dispersi, *wisker* yang mempunyai kekuatan ideal juga dipertimbangkan di sini. Pada umumnya dispersi yang seragam dan sangat pekat dihasilkan dengan jalan ekstrusi bahan yang disinter. Gb. 2.76 menunjukkan perbandingan kekuatan tarik pada temperatur tinggi di antara paduan. Ni-3%ThO_2 dengan Ni dan Hastelloy X, paduan Ni tahan panas. Paduan ini dibuat untuk sudu putar turbin gas pesawat terbang. Seperti telah dikemukakan, bahan berbutir halus dapat dibuat dengan jalan metalurgi bubuk. Tetapi beberapa macam bahan yang berbutir halus menunjukkan sifat super plastis pada temperatur tinggi. Selanjutnya pada paduan teratur ada fasa yang menunjukkan sifat khusus yaitu tegangan mulurnya meningkat pada temperatur tinggi, sebagai contoh ialah fasa Ni_3Al (γ'). Telah dilaporkan bahwa dengan mempertimbangkan hal tersebut di atas, satu bahan telah dibuat dengan menyinter fasa γ' yang berbutir halus, dan dengan memanfaatkan sifat super plastisnya telah dibuat komponen terdiri dari piringan turbin dan sudu turbin yang menjadi satu hanya dengan pemrosesan dua tahap saja. Karena dipakai pada temperatur tinggi tentu saja harus diadakan perlakuan panas untuk memperkasar butir.

Seperti telah dikemukakan di atas dengan metalurgi bubuk, mungkin membuat komponen berkualitas tinggi. Di masa mendatang cara ini akan dikembangkan lebih lanjut.

Sementara ini, ada beberapa produk penting sebagai hasil metalurgi bubuk yaitu ferit, magnit dst, yang diutarakan pada bagian IV.



Gb. 2.76 Pengaruh temperatur pada kekuatan tarik Ni, Ni-3% ThO_2 dan Hastelloy X (R. W. Fraserdkk.: Mod. Dev. in Powd. Met. Vol. 2, Plenum Press (1966) 87).

BAGIAN III

BAHAN POLIMER

1 ILMU POLIMER DAN SIFAT-SIFAT BAHAN POLIMER

Plastik, serat, film dan sebagainya yang biasa dipergunakan dalam kehidupan sehari-hari mempunyai berat molekul di atas 10.000. Bahan dengan berat molekul yang besar itu disebut polimer, mempunyai struktur dan sifat-sifat yang rumit disebabkan oleh jumlah atom pembentuk yang jauh lebih besar dibandingkan dengan senyawa yang berat atomnya rendah. Umumnya suatu polimer dibangun oleh satuan struktur tersusun secara berulang diikat oleh gaya tarik-menarik yang kuat yang disebut ikatan kovalen, di mana setiap atom dari pasangan terikat menyumbangkan satu elektron untuk membentuk sepasang elektron. Gaya tarik-menarik di antara atom-atom di dalam benda-benda digolongkan: (1) ikatan kovalen, (2) ikatan ion, (3) ikatan logam, (4) ikatan koordinat, (5) ikatan hidrogen, (6) gaya van der Waals, (7) ikatan hidro-fobik. Di antaranya (1), (5) dan (6) biasa ditemukan pada bahan polimer, sedangkan (2), (4) dan (7) ditemukan kadang-kadang. Gaya antar molekul yang terutama bekerja pada bahan polimer seperti (5) dan (6), juga lebih lemah dari pada ikatan kovalen.

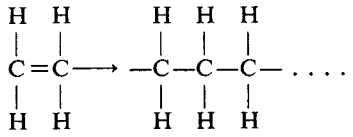
Bahan polimer yang mempunyai berat molekul besar dan berikatan kovalen, samasekali menunjukkan sifat-sifat yang berbeda dari bahan organik yang mempunyai berat molekul rendah. Bahan yang mempunyai berat molekul rendah berubah menjadi cair dengan viskositas rendah atau menguap kalau dipanaskan, sedangkan bahan polimer mencair dengan sangat kental dan tidak menguap. Bahan yang tidak bisa berfusi itu terurai karena panas menjadi karbon, pada tahap akhir tanpa penguapan.

Banyak bahan yang mempunyai berat molekul rendah larut pada pelarut yang mempunyai viskositas rendah, sedangkan sejumlah bahan polimer umumnya tidak larut pada zat pelarut dan kalaupun bisa larut, viskositasnya sangat tinggi. Beberapa istilah teknis sering dipakai bagi bahan polimer yang dijelaskan di bawah.

(1) Monomer

Bahan polimer biasa terbentuk oleh satuan struktur secara berulang. Unit tersebut dinamakan monomer.

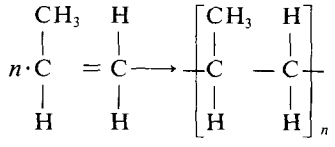
Contoh: Polietilen



Etilen (monomer) Polietilen

(2) Berat molekul dan derajat polimerisasi

Polipropilen terdiri dari banyak monomer propilen dalam rantai kombinasi.



Propilen Polipropilen

Polipropilen dibentuk oleh n satuan monomer propilen. Jumlah satuan struktur yang berulang ini (n) dikenal sebagai derajat polimerisasi. Berat molekul dari polimer (M) adalah berat molekul satuan (a) dikalikan dengan derajat polimerisasi (n): $M=a.n$. Dalam polimer, berat molekul (M) tidak selalu sama akan tetapi berubah, oleh karena itu, harga tersebut biasa dinyatakan dengan berat molekul rata-rtata ($\bar{M}$). Berat molekul rata-rata berbeda ditinjau dari cara pengukurannya. Apabila jumlah molekul (N) tersedia seperti pada osmometri, berat molekul rata-rata secara aritmatik dapat ditentukan.

$$\bar{M}_N=\frac{\Sigma M\cdot N}{\Sigma N}$$

Dengan metoda hamburan cahaya, berat molekul rata-rata dapat ditentukan.

$$\bar{M}_W=\frac{\Sigma M^2 N}{\Sigma M\cdot N}$$

Selanjutnya, sehubungan dengan viskositas, berat molekul rata-rata $\bar{M}_v$, apabila viskositas intrinsik $[\eta]=KM^{\alpha}$, menunjukkan nilai yang agak rumit yaitu sebagai berikut:

$$\bar{M}_v=\left[\frac{\Sigma M^{1+\alpha}N}{\Sigma M\cdot N}\right]^{1/\alpha}$$

Pada umumnya apabila berat molekul terdistribusikan maka $\bar{M}_N<\bar{M}_V<\bar{M}_W$, sedangkan kalau berat molekul tersebut homologus, maka $\bar{M}_N=\bar{M}_V=\bar{M}_W$. Seringkali nilai $\bar{M}_W/\bar{M}_N$ dipergunakan untuk melihat keseragaman distribusi berat molekul. Nilai yang lebih besar adalah untuk distribusi yang lebih lebar. Distribusi berat molekul mempunyai hubungan erat dengan sifat-sifat bahan polimer.

Molekul polimer disusun dalam satu struktur rantai seperti polietilen dan polipropilen, dalam struktur tiga dimensi dengan ikatan kovalen seperti phenol dan resin epoksi, dan dalan hal struktur hubungan silang seperti karet di mana sebagian molekul rantai terikat satu sama lain. Sifat-sifat termik dan mekanik dari polimer sangat berbeda tergantung pada keadaan.

Sebagai contoh, kebanyakan molekul rantai memberikan sifat termoplastik dengan menaikkan temperatur, dapat mencair dan mengalir. Bahan tersebut dinamakan polimer termoplastik. Di lain fihak polimer yang struktur tiga dimensinya terkeraskan karena pemanasan, tidak bersifat dapat mengalir lagi karena pemanasan. Bahan tersebut dinamakan resin termoset. Polimer yang dihubung-silangkan secara tepat dengan S atau lainnya, seperti halnya karet, menunjukkan sifat elastomer, dapat berdeformasi karena diregangkan dan kembali ke asal apabila dilepas. Beberapa di antara polimer rantai seperti polietilen, nylon, dsb, mempunyai molekul-molekul yang tersusun secara teratur membentuk kristal. Bahan tersebut dinamakan polimer kristal walaupun tidak seluruhnya mengristal. Temperatur di mana kristal dalam polimer itu mencair dinamakan titik cair polimer. Polistiren, polimetil metakrilat, dsb, yang strukturnya tidak teratur secara stereo dalam keadaan amorf karena tidak dapat

membentuk kristal dengan molekul rantai yang tersusun beraturan, dinamakan polimer amorf. Akibatnya polimer macam ini tidak mempunyai titik cair dan melunak kalau dipanaskan. Dalam polimer kristal, bagian yang tidak ditempati kristal tetap amorf. Derajat pengristalan dinamakan kristalinitas, yang mempunyai hubungan erat dengan berbagai macam sifat.

Sifat-sifat khas bahan polimer pada umumnya adalah sebagai berikut:

1) Mampu cetak adalah baik. Pada temperatur relatif rendah bahan dapat dicetak dengan penyuntikan, penekanan, ekstrusi, dan seterusnya, yang menyebabkan ongkos pembuatan lebih rendah dari pada untuk logam dan keramik.
2) Produk yang ringan dan kuat dapat dibuat. Berat jenis polimer rendah dibandingkan dengan logam dan keramik, yaitu 1,0–1,7, yang memungkinkan membuat barang kuat dan ringan.
3) Banyak di antara polimer bersifat isolasi listrik yang baik. Polimer mungkin juga dibuat konduktor dengan jalan mencampurnya dengan serbuk logam, butiran karbon, dan sebagainya.
4) Baik sekali dalam ketahanan air dan ketahanan zat kimia. Pemilihan bahan yang baik akan menghasilkan produk yang mempunyai sifat-sifat baik sekali. (Contoh: Politetrafluoroetilen, dsb).
5) Produk-produk dengan sifat yang cukup berbeda dapat dibuat tergantung pada cara pembuatannya. Dengan mencampur zat pemplastis, pengisi dan sebagainya sifat-sifat dapat berubah dalam daerah yang luas. Sebagai contoh polivinil klorida dengan zat pemplastis karet dengan pengisi (serbuk karbon), plastik diperkuat serat gelas (FRP=*fiberglass reinforced plastics*) dst.
6) Umumnya bahan polimer lebih murah.
7) Kurang tahan terhadap panas. Hal ini sangat berbeda dengan logam dan keramik. Walaupun ketahanan panas bahan polimer tidak sekuat logam dan keramik, pada penggunaannya harus cukup diperhatikan.
8) Kekerasan permukaan yang sangat kurang. Bahan polimer yang keras ada, tetapi masih jauh di bawah kekerasan logam dan keramik.
9) Kurang tahan terhadap pelarut. Umumnya larut dalam zat pelarut tertentu kecuali beberapa bahan khusus seperti politetrafluoretilen. Kalau tidak dapat larut, mudah retak karena kontak yang terus menerus dengan pelarut dan disertai adanya tegangan. Karena itu perlu perhatian yang cukup.
10) Mudah termuati listrik secara elektrostatik. Kecuali beberapa bahan yang khusus dibuat agar menjadi hantaran listrik, kurang higroskopik dan dapat dimuati listrik.
11) Beberapa bahan tahan abrasi, atau mempunyai koefisien gesek yang kecil.

Dengan melihat berbagai sifat yang disebutkan di atas, maka sangat penting untuk dapat memilih bahan yang paling cocok.

1.1 Masa jenis

Sifat yang pertama harus dipelajari ialah masa jenisnya, karena menyangkut banyak sifat-sifat polimer. Masa jenisnya jauh lebih rendah daripada logam (2,7–9) dan keramik (2,1–5,3). Oleh karena itu harga per satuan masa jenis sering lebih besar daripada bahan lain. Diperbandingkan dalam volume yang sama, lebih mudah didapat bahan yang lebih ringan dan lebih kuat. Dilihat dari mahal atau murahnya, masa jenis adalah faktor yang penting. Untuk membandingkan bahan-bahan yang menyangkut berat dan volume, selanjutnya bahan polimer kadang-kadang dipakai memperkecil masa jenis dengan pembusaan, karena itu masa jenisnya menjadi lebih

penting daripada bahan lain. Polietilen dan polipropilen mempunyai masa jenis lebih kecil dari air, yang memungkinkan membuat suatu barang terapung di atas air. Pada nilon, poliester, polipropilen, polietilen, dan seterusnya, yang mengandung kristal, masa jenis di bagian yang berkristal lebih tinggi daripada di bagian yang amorf, karena itu masa jenisnya, tergantung pada derajat kristalinitasnya. Hubungan antara masa jenis (ρ) dan kristalinitas (χ) dikenal sebagai berikut;

$$\rho=\frac{\rho_c}{\chi}\left(\frac{\rho-\rho_a}{\rho_c-\rho_a}\right)$$

di mana ρ adalah masa jenis bahan, ρ_c dan ρ_a adalah masing-masing masa jenis bagian kristal dan amorf, χ adalah kristalinitas (kristalinitas berat), dan χ_v didapat dari;

$$\chi_v=\left(\frac{\rho-\rho_a}{\rho_c-\rho_a}\right) \text{ adalah kristalinitas volume.}$$

Tabel 3.1 Masa jenis kristal dan serat amorf.

Serat	Kristal ρ_c (g/cm^3)	Amorf ρ_a (g/cm^3)
Selulosa	1,588	1,510
Nilon 6	1,23	1,11
Nilon 66	1,24	1,09
Poliester	1,455	1,30
Vinilon	1,34	1,27
Viniliden	1,95	1,66
Polipropilen (Isostatik)	0,93	0,86
Polietilen	1,00	0,81–0,85

Tabel 3.1 menunjukkan harga ρ_c dan ρ_a dari serat polimer yang khas. Masa jenis berbagai plastik dan bahan industri diperlihatkan dalam Gb. 3.1 (a–1), (1–2) dan (b).

Masa jenis nilon adalah 1,1–1,14, poliasetal 1,43 dan politetrafluoroetilen (fluororesin) kira-kira 2,2 mempunyai kristalinitas lebih baik, dan polivinilliden klorid 1,7. Sifat ringan tersebut adalah salah satu sifat khas dari bahan polimer walaupun ada perbedaan sedikit dari masing-masing harga masa jenis tersebut.

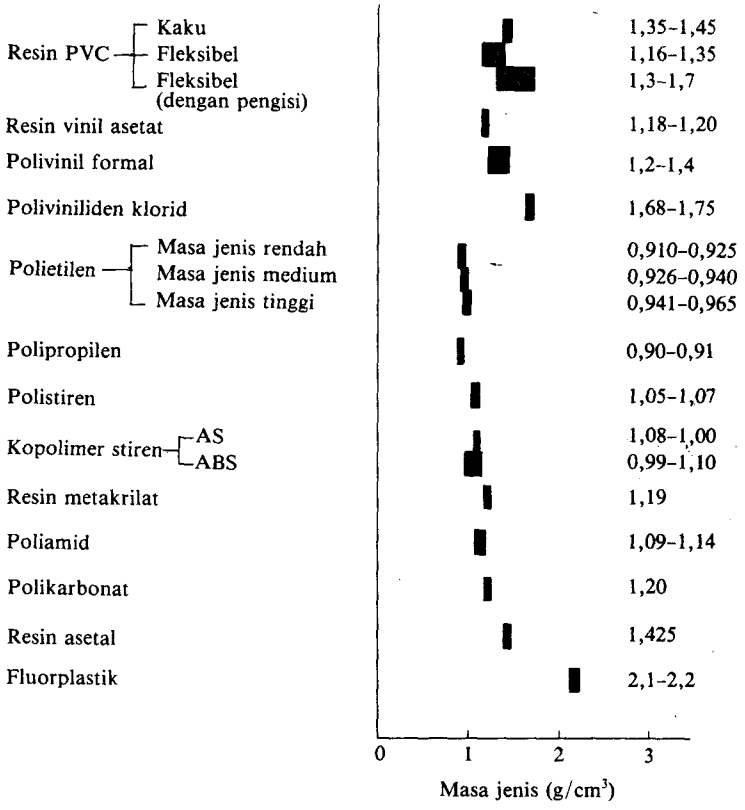
1.2 Sifat-sifat mekanik

Sifat-sifat mekanik bahan polimer adalah khas dengan kelakuan viskoelastiknya yang dominan. Sebagai contoh, pemelaran (*creep*) dan relaksasi mudah terjadi, dan pada pengujian tarik sifat-sifatnya sangat dipengaruhi oleh laju tarikan. Sifat-sifatnya juga berubah karena temperatur, oleh karena itu dalam hal ini perlu perhatian yang cukup sebelum penggunaan bahan polimer.

Secara sederhana, di bawah ini akan diuraikan kelakuan viskoelastisnya yang merupakan salah satu kekhasan dari bahan polimer. Telah diketahui bahwa dengan meregangkan film polietilen, perpanjangan tidak selalu sebanding lurus dengan beban yang diberikan, dan pada penurunan kembali beban, sebagian kecil regangannya hilang kembali, tetapi sebagian besar tetap ada yang tidak kembali ke panjang asal, karena bahan polimer tidak selengkapnya merupakan bahan yang elastik tetapi mempunyai faktor viskositas. Bahan yang mempunyai kedua sifat elastik dan kental disebut bahan viskoelastik.

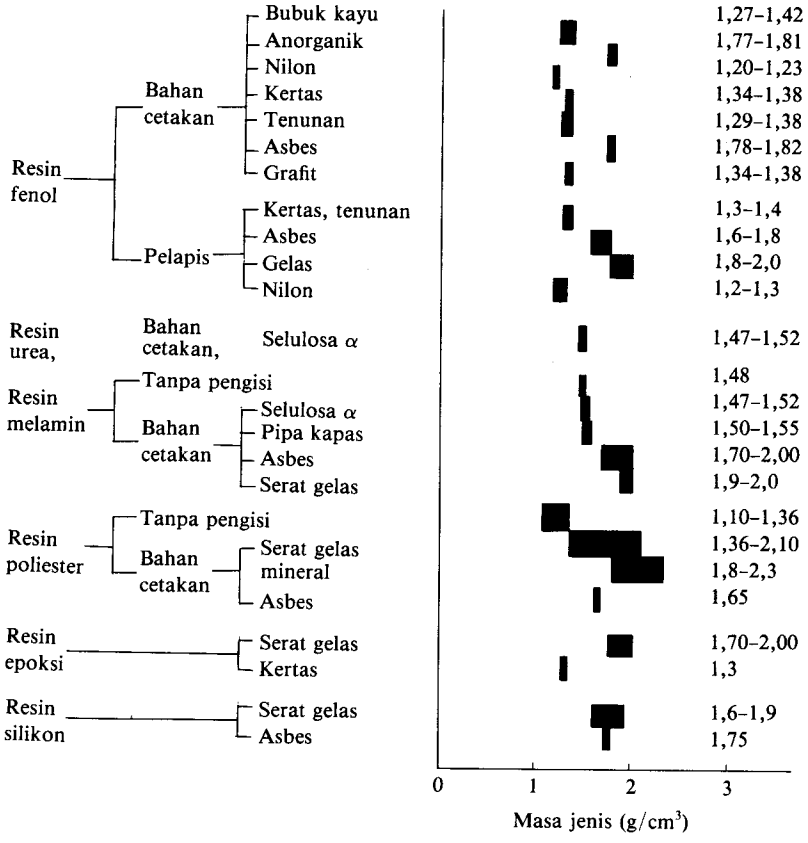
Sebagai contoh dapat dibayangkan sepotong permen karet yang hangat, sementara dapat bertahan dalam bentuknya, tetapi setelah beberapa saat berubah bentuk karena beratnya sendiri. Hal ini disebabkan karena faktor viskositas dan karena beratnya sendiri membuat bahan tersebut mengalir (berdeformasi plastis). Kalau sepotong permen karet tersebut selama masih panas dan lunak diregangkan perlahan-lahan oleh kedua tangan, ia akan menjadi panjang dan tipis. Tetapi kalau diregangkan secara cepat ia akan patah dengan permukaan patahan yang rata seperti halnya pada patahan getas. Kelakuan ini sangat berubah tergantung pada laju deformasi. Kalau permen tersebut dibulatkan dan dijatuhkan pada permukaan benda padat, ia memantul seperti karet. Kalau didinginkan akan menjadi kaku dan sukar diregangkan. Dalam hal ini waktu deformasi dan temperatur memberikan pengaruh banyak terhadap sifatd-sifat mekanik permen karet tersebut. Kelakuan semacam itu adalah khas sifat viskoelastik. Setiap bahan pada dasarnya mempunyai sifat-sifat demikian, tapi pada bahan polimer sifat tersebut sangat jelas dapat teramati.

Sifat-sifat viskoelastik pada dasarnya berhubungan dengan hal-hal berikut. Sebagai suatu faktor elastik, keelastikan Hooke, dapat dinyatakan oleh model sebuah pegas. Sebagai suatu faktor viskositas, viskositas Newton dapat dinyatakan oleh model sebuah peredam terisi cairan kental dengan torak yang dapat bergerak. Deformasi pegas adalah elastik yang dapat dikembalikan seluruhnya ke keadaan semula kalau gaya ditiadakan. Hal ini serupa dengan peredam di mana torak bergerak dalam

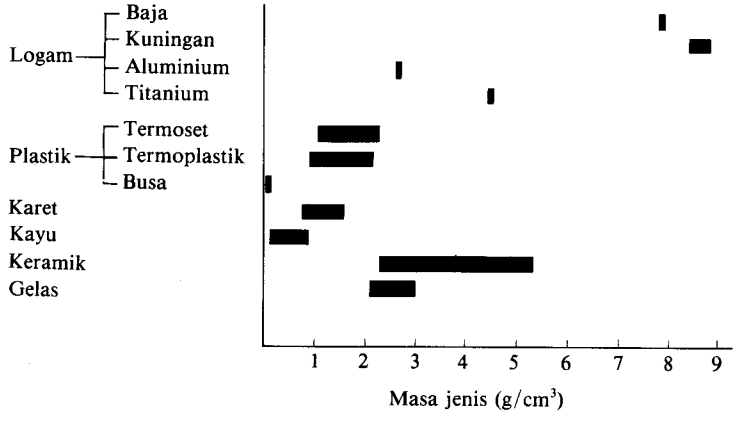


(a-1) Masa jenis resin termoplastik

Gb. 3.1 Masa jenis berbagai plastik dan bahan industri.



(a-2) Masa jenis resin termoset

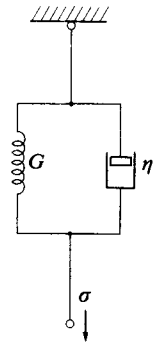


(b) Masa jenis bahan industri

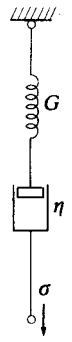
Gb. 3.1 Masa jenis berbagai plastik dan bahan industri.

minyak kental menghabiskan sejumlah energi mekanik dalam aliran minyak kental, jadi energi tidak pernah dapat dikembalikan meskipun gaya ditiadakan.

Di bawah ini dijelaskan kelakuan dua unsur sederhana dalam kombinasi (1). Sebuah pegas dan sebuah peredam disusun paralel seperti dalam Gb. 3.2. (2) Pegas



Gb. 3.2 **Model Voigt.**



Gb. 3.3 **Model Maxwell.**

dan peredam disusun seri seperti dalam Gb. 3.3. Yang pertama adalah model Voigt dan yang kedua adalah model Maxwell. Melihat kepada hubungan antara gaya (σ) dan regangan (γ) dari model tersebut, yang pertama menyatakan:

Jumlah gaya=Gaya pegas+gaya peredam

di mana regangan pada pegas dan peredam sama besar. Yang kedua menyatakan:

Jumlah regangan=regangan pegas+regangan peredam

di mana gaya pegas sama dengan gaya pada peredam. Masing-masing dapat dinyatakan dalam persamaan sebagai berikut:
Pada model Voigt:

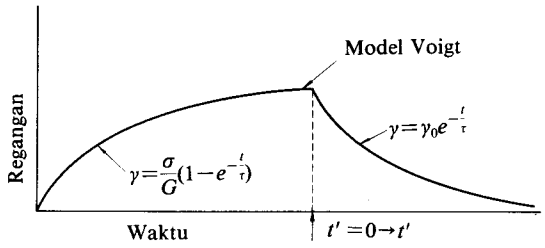
$$\eta\frac{d\gamma}{dt}+G\gamma=\sigma \tag{3.1}$$

dan pada model Maxwell:

$$\frac{d\gamma}{dt}=\frac{1}{\eta}\sigma+\frac{1}{G}\frac{d\sigma}{dt} \tag{3.2}$$

di mana η adalah koefisien viskositas peredam dan G modulus elastik pegas. Ini adalah persamaan dasar bagi model bersangkutan untuk dipecahkan dengan pemelaran (*creep*), tegangan relaksasi, perpanjangan dan lainnya disubstitusikan. Umumnya kelakuan melar dapat secara mudah dijelaskan oleh model Voigt sedangkan relaksasi tegangan oleh model Maxwell.

Perhatikan mengenai melar. Kalau gaya (σ) diberikan dan dihilangkan setelah waktu tertentu, akan menghasilkan kurva deformasi seperti pada Gb. 3.4 yang dinyatakan dalam persamaan:



Gb. 3.4 **Kurva waktu-tegangan benda viskoelastik (Model Voigt).**

$$\gamma=\frac{\sigma}{G}(1-e^{-(G/\eta)t})=\frac{\sigma}{G}(1-e^{-t/\tau})$$

di mana $\tau=\eta/G$ disebut waktu retardasi (kelambanan). Kalau gaya ditiadakan, perlahan-lahan dikembalikan ke keadaan semula yang dinyatakan oleh $\gamma=\gamma_0 e^{-t/\tau}$, di mana γ_0 adalah regangan maksimal dari melar (regangan, kalau gaya ditiadakan), pengembaliannya bersifat eksponen. Kalau waktu retardasi (τ) kecil waktu pengembaliannya singkat, sedangkan kalau (τ) besar, pengembaliannya perlahan-lahan. Suatu hubungan ditetapkan oleh keelastikan pegas (G) dan viskositas peredam (η). Yaitu apabila suatu benda elastik, dalam hal ini berupa pegas, adalah besar (lebih elastik), waktu retardasi singkat untuk mencapai pengembalian yang cepat. Bertentangan dengan itu kalau G kecil dan unsur viskositas (η) besar, τ menjadi besar yang mengakibatkan pengembalian lambat memerlukan waktu lama. Jadi waktu retardasi (τ) merupakan faktor penting untuk menunjukkan derajat retardasi dalam deformasi.

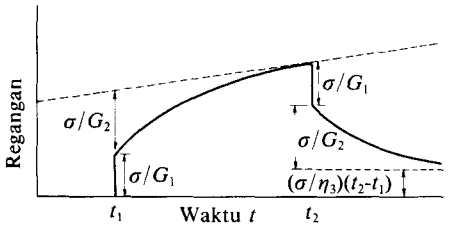
Dalam hal serupa dapat dipelajari relaksasi tegangan dengan mempergunakan model Makswell. Kalau bahan dengan cepat dideformasikan dan ditahan, tegangan tidak berubah pada benda elastik, gaya tiba-tiba diperkecil (terjadi relaksasi) pada benda viskoelastik seperti polimer. Persamaan Makswell dipecahkan dengan $d\gamma/dt=0$ seperti berikut:

$$\sigma=\sigma_0 e^{-(G/\eta)t}=\sigma_0 e^{-t/\tau}$$

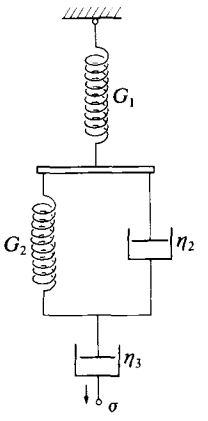
di mana σ_0 tegangan ketika permulaan diberikan deformasi yang cepat. Dengan jalan yang sama seperti pengembalian tegangan pada deformasi creep, gaya berkurang secara eksponen. Laju pengurangan tersebut tergantung pada waktu relaksasi (τ) dinyatakan oleh persamaan yang sama seperti di atas $\tau=\eta/G$. Kalau waktu relaksasi (τ) lama, yaitu kalau keelastisan pegas kecil (pegas mudah diperpanjang) dan viskositas (η) besar, maka tegangan direlaksasikan perlahan-lahan. Perubahan waktu relaksasi demikian, adalah faktor penting yang menyatakan laju relaksasi tegangan. Ini disebut waktu retardasi pemelaran sebagai ukuran yang menyatakan laju deformasi yang diperlamban, sedangkan yang disebut waktu relaksasi dalam relaksasi tegangan sebagai suatu ukuran yang menyatakan laju relaksasi, tetapi sebenarnya adalah sama bentuknya, keduanya biasa dinyatakan dengan simbol yang sama yaitu (τ).

Tetapi, karena hubungan antara deformasi dan tegangan dalam bahan polimer sebenarnya tidak dapat dijelaskan dengan dua unsur sederhana di atas, maka diambil lebih banyak unsur untuk lebih memperjelas. Sebagai contoh, dalam pemelaran pada bahan polimer dengan memberikan gaya tertentu sering teramati deformasi yang diperlihatkan pada Gb. 3.5. Pertama terjadi deformasi elastik seketika, diikuti oleh deformasi melar. Setelah waktu tertentu apabila tegangan dihilangkan, benda uji seketika kembali sebagian ke bentuk asal, kemudian sebagian lagi kembali dalam waktu yang lama. Tetapi ada sebagian regangan yang tidak dapat kembali setelah waktu lama. Cara deformasi seperti itu banyak diketemukan, suatu garis besar pendekatan yang sering dipakai untuk berbagai bahan mempergunakan model empat unsur kombinasi pegas dan peredam yang ditunjukkan dalam Gb. 3.6. Tetapi bagi bahan sesungguhnya memerlukan lebih banyak unsur dalam model tersebut karena model dengan empat unsur masih belum mencukupi.

Pada penggunaan bahan polimer perlu berhati-hati, karena sifat mekanik bahan polimer sangat menunjukkan kelakuan viskoelastisnya, yang berbeda sekali dengan bahan logam atau keramik.



Gb. 3.5 Melar (*creep*) bahan viskoelastik.



Gb. 3.6 Model empat unsur.

Peringatan sebelumnya yang biasa diberikan dalam penggunaan bahan polimer seperti pada sifat-sifat mekaniknya adalah sebagai berikut:

1) Sifat-sifatnya sangat berubah karena temperatur, kadang-kadang berbeda banyak meskipun dalam daerah temperatur yang relatif rendah. Karena ketahanan panasnya buruk, diperlukan perhatian yang cukup untuk tidak dipakai pada temperatur tinggi.
2) Karena sifat viskoelastik yang dapat diamati, banyak bahan biasa mengalami pemelaran dan relaksasi tegangan. Terutama bagi polietilen dan polipropilen, yang gaya antar molekulnya lemah dan dikonfigurasikan hanya oleh gaya van der Waal, perlu perhatian khusus. Akan tetapi pada bahan polimer yang mempunyai banyak ikatan hidrogen dengan gaya antar molekul yang kuat dan demikian juga plastik termoset yang terbentuk dengan ikatan kovalen tiga dimensi, pengaruh tersebut di atas agak kurang.
3) Bahan harus dipilih secara hati-hati karena beberapa di antaranya ketahanan impaknya kecil. Akan tetapi, sekarang telah dikembangkan plastik yang mempunyai kekuatan impak tinggi seperti polikarbonat, polisulfon, poliasetal dan sebagainya.
4) Demikian juga bagi bahan yang tidak tahan lelah. Ada beberapa bahan yang dapat mengatasi tegangan tarik sederhana dan pemelaran tetapi tidak tahan terhadap kelelahan karena terjadi kombinasi beban antara penekanan dan penarikan.
5) Apabila dicelupkan ke dalam minyak, pelarut, air dengan surfaktan dst, beberapa bahan tahan untuk waktu singkat, tetapi apabila disertai tegangan dapat terjadi retak dan akhirnya putus. Terhadap bahan tersebut harus berhati-hati.
6) Regangan sisa dari pencetakan terjadi waktu pemanasan, mudah menyebabkan retakan karena tegangan.
7) Bahan yang cukup stabil harus dipilih, menghindari bahan ini yang tidak tahan radiasi ultra violet, oksigen, dst.

1.2.1 Kekuatan tarik

Kekuatan tarik adalah salah satu sifat dasar dari bahan. Hubungan tetgangan-regangan pada tarikan memberikan nilai yang cukup berubah tergantung pada laju

tegangan, temperatur, lembaban, dst, sebab dalam bahan polimer sifat-sifat viskoelastik mempunyai kekhasan seperti dinyatakan di atas. Pada bahan termoplastik kelakuan demikian sangat berubah dengan penyearahan molekul rantai dalam bahan. Umumnya kekuatan tarik dari bahan polimer lebih rendah daripada umpamanya baja 70 kgf/mm^2, duralumin 44 kgf/mm^2 dan sebagainya. Kekuatan tarik nilon 66 adalah 6,5–8,4 kgf/mm^2 dan PVC 3,5–6,3 kgf/mm^2. Pada resin biasa seperti polistiren, polietilen dan polipropilen kekuatan tariknya antara 0,7–8,4 kgf/mm^2. Sedangkan pada film dan serat sangat kuat, di mana molekul-molekulnya terarahkan oleh peregangan (lihat paragraf serat dan film).

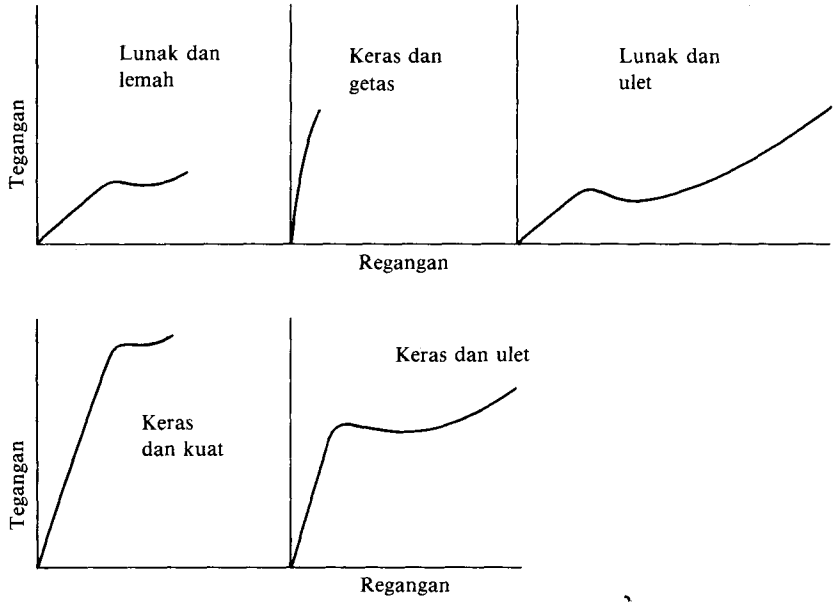
Gbr. 3.7 menunjukkan kelakuan tarikan dari bahan polimer dalam bentuk kurva tegangan-regangan menurut kekhasannya lunak atau besar, lemah atau kuat, getas atau liat. Dilihat dari kelakuan mulurnya ada tiga jenis kurva tegangan-regangan seperti ditunjukkan pada Gb. 3.8.

Seperti ditunjukkan oleh garis OA_1 pada (a) laju perpanjangafn agak rendah dan meningkat sampai 0,5–2% pada saat patah menunjukkan hubungan lurus. Bahan yang termasuk kelompok ini adalah fenol, urea, melamin, poliester tak jenuh, epoksi dan resin stiren yang bersifat patah getas.

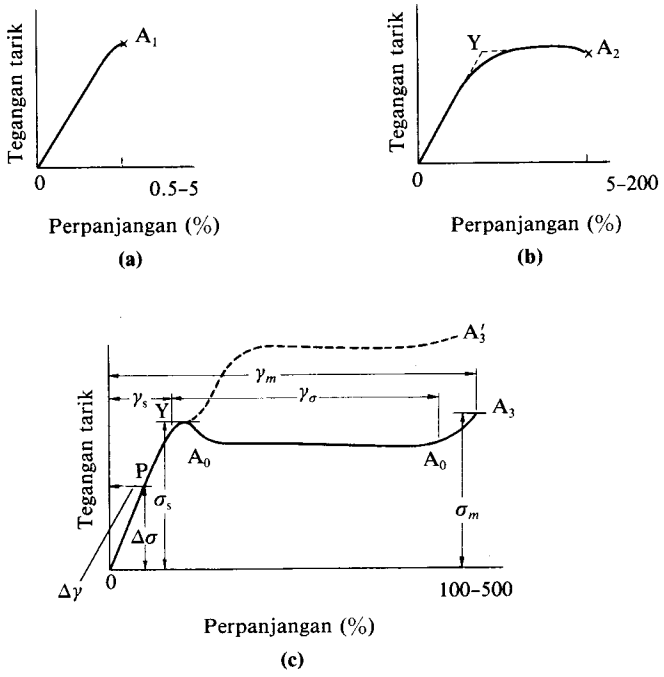
Pada jenis selanjutnya, yang ditunjukkan pada (c), OY adalah lurus sampai titik mulur pada Y, tetapi setelah itu memberikan perpanjangan yang besar sampai 100–1.000%, dan sebelum patah tegangan tarik meningkat dengan cepat. Kadang-kadang peningkatan terakhir ini tidak dapat teramati. Bahan yang termasuk kelompok ini adalah polietilen, polipropilen, poliasetal dan lainnya yang terdiri dari molekul rantai.

Jenis (b) ada di antara (a) dan (c) yang tidak menunjukkan penurunan beban setelah titik mulur seperti halnya ditunjukkan pada (c) tetapi hanya satu titik infleksi, jadi beban meningkat yang akhirnya mengakibatkan patah. Bahan yang termasuk jenis ini adalah resin ABS, asetat, resin fluoro, dst.

Kelakuan bahan tersebut di atas berlaku pada temperatur kamar (20°C). Kelakuan tersebut akan berubah banyak apabila temperatur berubah. Resin termoset



Gb. 3.7 Kelakuan tarikan bahan polimer.



Gb. 3.8 Kelakuan mulur dalam kurva tegangan-regangan.

seperti resin fenol menunjukkan kelakuan semacam pada (a), walaupun temperatur berubah sampai batas tertentu, sedangkan resin termoplastik sering berubah dari kelakuan (a) ke (c) apabila temperatur meningkat.

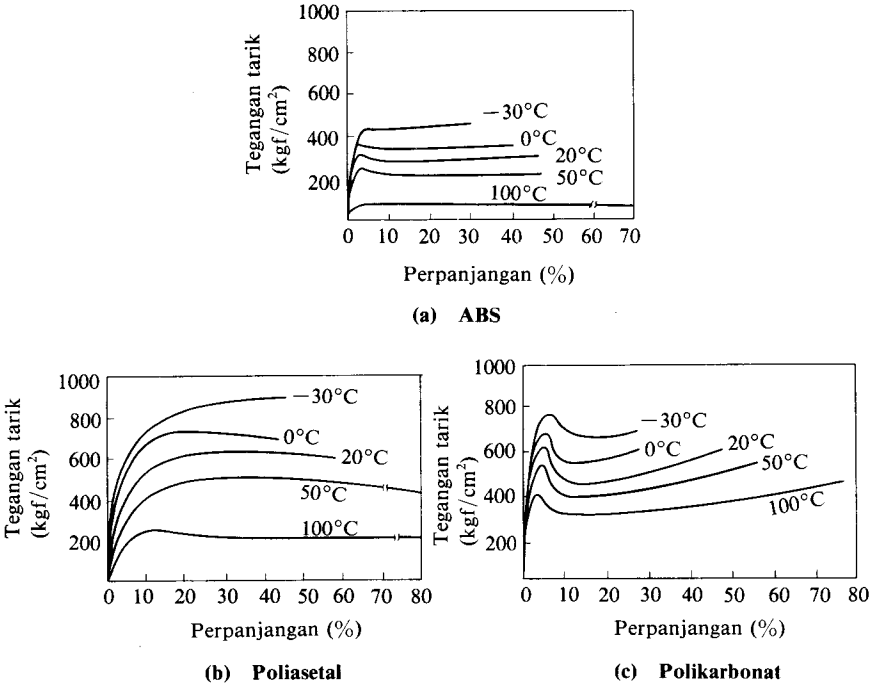
Dari setiap gambar tersebut, konstanta perbandingan antara tegangan dan regangan pada bagian lurus OY adalah modulus elastik yaitu modulus elastik Young. Modulus elastik Young pada bahan polimer terletak di daerah $0{,}1\text{–}21\times10^2$ kgf/mm^2.

Harga tersebut lebih rendah daripada untuk baja yaitu 200×10^2 kgf/mm^2. Akan tetapi kalau molekul rantai cukup terarah seperti serat, maka harga tersebut di atas menjadi lebih besar hampir menyamai logam. Deformasi oleh penarikan sampai patah berbeda banyak tergantung pada jenis dan temperatur. Pada 20°C perpanjangannya ada pada daerah luas yaitu 0,5–700%. Kebanyakan dari plastik termoset, kurang dari 5%. Pada resin termoplastik berkristal kebanyakan menunjukkan tipe (c) dengan perpanjangan yang jelas.

(1) Pengaruh temperatur

Telah dikemukakan berkali-kali bahwa pengaruh temperatur pada resin termoplastik sangat besar. Kalau temperatur dinaikkan kekuatan tariknya turun. Kurva tegangan-regangan berubah banyak seperti ditunjukkan pada Gb. 3.9 (a), (b) dan (c). Pada setiap temperatur tertentu (titik lunak, titik transisi gelas) sebagai batas, deformasi karena tarikan meningkat cepat dan tegangan patahnya serta modulus elastiknya menurun. Berlawanan dengan itu di bawah temperatur tersebut, tegangan patah dan modulus elastik meningkat dan regangan patahnya kecil. Jadi pada bahan polimer perlu mengenal jenis temperatur khas tersebut (titik lunak, titik transisi gelas).

Walaupun pada temperatur dekat pada temperatur kamar, perubahan tiba-tiba bisa terjadi pada polimer termoplastik, oleh karena itu perlu berhati-hati.



Gb. 3.9 Kurva tegangan-regangan.

(2) Pengaruh kelembaban

Pada umumnya pengaruh kelembaban serupa dengan pengaruh temperatur. Meningkatnya kadar air yang terabsorpsi cenderung memberikan hubungan tegangan-regangan serupa dengan pengaruh temperatur. Dengan bertambahnya absorpsi air tegangan patah dan modulus elastik menurun sedangkan regangan patah meningkat. Akan tetapi pengaruh tersebut kurang dibandingkan dengan pengaruh temperatur. Pada resin termoset dan resin termoplastik sama sekali tidak higroskopi, tentunya pengaruh air tidak terlihat. Akan tetapi, kadang-kadang kadar air rendah dan surfaktan dalam air dapat menyebabkan pengurangan modulus elastik dan meningkatkan retakan karena tegangan.

(3) Pengaruh laju tegangan

Telah diketahui dari berbagai bahan bahwa kelakuan bahan berubah karena pembebanan apakah beban itu ringan dan perlahan atau tiba-tiba, pengaruh tersebut sangat terlihat pada bahan yang mempunyai sifat viskoelastik seperti polimer. Kalau laju tegangan dikurangi perpanjangan bertambah yang mengakibatkan kurva tegangan-regangan menjadi landai maka modulus elastiknya menjadi kecil dan batas mulurnya tidak jelas. Kecenderungan ini sangat terlihat pada resin yang fleksibel pada temperatur kamar. Makin tinggi laju tegangan makin besar beban patah dan modulus elastiknya sedangkan perpanjangan menjadi kecil. Jadi laju tegangan memberikan pengaruh besar pada sifat-sifat mekanik bahan polimer, oleh karena itu persyaratan yang ketat ditetapkan untuk setiap pengujian.

Seperti telah dikemukakan di atas bahan polimer mempunyai masa jenis rendah dibandingkan dengan bahan lain, karena itu bahan polimer baik untuk produk ringan dan kuat.

$$\text{Kekuatan tarik spesifik} = \frac{\text{Kekuatan tarik}}{\text{Masa jenis}}$$

$$\text{Modulus elastik spesifik} = \frac{\text{Modulus elastik}}{\text{Masa jenis}}$$

Harga di atas adalah lebih tinggi untuk bahan polimer. Jadi, menguntungkan memakai bahan polimer untuk bahan komposit, pesawat terbang dan mobil. Penggunaannya menjadi lebih luas karenanya.

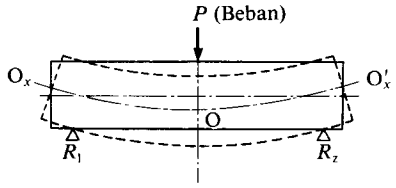
1.2.2 Sifat tekukan, lenturan

Perlu mengetahui sifat tekukan bahan. Seperti ditunjukkan pada Gb. 3.10, kalau batang uji ditumpu pada R_1 dan R_2 dan beban tekuk (P) diberikan di tengah, tegangan tekuk maksimum (σ) pada titik nol di tengah adalah

$$\sigma = \frac{3}{2}\frac{PL}{bd^2}$$

di mana

P: Beban patah
b: Lebar batang uji
d: Tebal batang uji
L: Jarak antara titik tumpu



Gb. 3.10 Pengujian lentur.

Kekuatan tekuk berubah menurut ukuran batang uji L/d, oleh karena itu, umumnya ditentukan pada $L/d = 15$–17. Modulus Young pada lenturan E_f didapat dari persamaan:

$$E_f = \frac{L^3}{4d^3b} \cdot \frac{P}{\delta}$$

Di mana P adalah beban lentur, δ adalah defleksi dan P/δ didapat dari gradien garis lurus pada kurva beban vs defleksi.

Umumnya pada bahan polimer modulus elastik untuk tekan berbeda dengan untuk tarik, tegangan tekan yang besar terjadi pada bagian yang mengalami tegangan tekan (bagian atas Gb. 3.10). Selanjutnya pada bahan polimer kekuatan tekan jauh lebih besar dari pada kekuatan tarik, hal inilah yang menyebabkan patah karena tekukan pada bagian yang mengalami tegangan tarik. Seperti ditunjukkan pada Tabel 3.2, kekuatan tekuk lebih besar dari pada kekuatan tarik tetapi lebih kecil daripada kekuatan tekan, atau berada di antaranya. Modulus Young pada lenturan adalah 50–1.200 kgf/mm^2, kira-kira 1/20–1/400 nya dari baja. Karena defleksi pada lenturan biasanya besar, defleksi perlu diperiksa sebelum pemakaian. Sifat tekukan dapat diperbaiki dengan diperkuat oleh serat gelas kekuatan tekuk mencapai 15–40 kgf/mm^2.

1.2.3 Sifat-sifat pada penekanan

Beban tekan bekerja kebalikan beban tarik. Karena bahan polimer mempunyai cacat yang kecil atau mengandung zat pengisi tertentu, maka bahan polimer dapat mengalami deformasi yang besar, umumnya kekuatan tekan lebih besar dari pada kekuatan tarik dan modulus elastik untuk tekan juga lebih besar dari pada untuk tarik.

Tabel 3.2 Kekuatan tarik, tekan dan lentur bahan polimer.

	Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	Perpanjangan (%)	Modulus elastik ($kgf/mm^2 \times 10^2$)	Kekuatan tekan (kgf/mm^2)	Kekuatan lentur (kgf/mm^2)
Resin termoset					
Resin fenol (Bakelit):					
Tanpa pengisi	4,9–5,6	1,0–1,5	5,2–7	7–21	8,4–10,5
Dengan bubuk kayu	4,5–7	0,4–0,5	5,6–12	15,4–25,2	5,9–8,4
Dengan asbes	3,8–5,2	0,18–0,50	7–21	14–24	5,6–9,8
Dengan serat gelas	3,6–7	0,2	23,1	12–24	7–42
Resin melamin:					
Dengan pengisi	—	—	—	—	—
Dengan selulosa	4,9–9,1	0,6–1,0	8,4–9,8	17,5–30,1	7–11,2
Resin urea:					
Dengan selulosa	4,2–9,1	0,4–1,0	7–10,5	17,5–31	7–11,2
Resin poliester:					
Dengan pengisi (coran kaku)	4,2–9,1	< 5	2,1–4,2	9,1–25	5,9–16,1
Dengan serat gelas	17,5–2,1	0,5–5,0	5,6–14	10,5–21	7–28
Dengan serat sintetik	3,1–4,2	—	—	14–21	7–8,4
Resin epoksi:					
Dengan pengisi (coran)	2,8–9,1	3–6	2,4	10,5–17,5	9,3–14,7
Dengan serat gelas	9,8–2,1	4	2,1	21–26	14–21
Resin Silikon:					
Dengan serat gelas	2,8–3,5	—	—	7–10,5	7–9,8
Resin termoplastik					
Stiren:					
G.P.	4,5–6,3	1,0–2,5	2,8–3,5	8–11,2	6,9–9,8
Dikopolimerkan dengan akrilonitril	6,6–8,4	1,5–3,5	2,8–3,9	9,8–11,9	9,8–13,3
Resin ABS	1,6–6,3	10–140	0,7–2,8	1,7–7,7	2,5–9,4
Nilon:					
Nilon 6	7,1–8,4	25–320	1,0–2,6	4,6–8,5	5,6–11,2
Nilon 66	4,9–8,4	25–200	1,8–2,8	5–9,1	5,6–9,6
Polietilen:					
Masa jenis tinggi	2,1–3,8	15–100	0,4–1	2,2	0,7
Masa jenis rendah	0,7–1,4	90–650	0,14–0,24	—	—
Polipropilen:					
—	3,3–4,2	200–700	1,1–1,4	4,2–5,6	4,2–5,6
Resin PVC:					
Kaku	3,5–6,3	2–40	2,4–4,2	5,6–9,1	7–11,2
dengan pemlastis	0,7–2,4	200–400	—	0,7–1,2	—
Poliasetal: (Delrin)	6,1–7	15–40 ext. 75	2,4–2,8	12,6	8,4–9,8
Polikarbonat:					
—	5,6–6,6	60–100	22	7,7	7,7–9,1
Politetrafluoroetilen: (Telfon)	1.4–3,1	200–400	0,4	1,19	—
Baja lunak					
Untuk konstruksi 0,1–0,2%C	38	30	300	38	

Modulus elastik untuk tekan E_c diperoleh dari tegangan tekan $\Delta\sigma_c$ dan penyusutan $\Delta\gamma_c$ pada bagian lurus kurva hubungan tegangan-regangan.

$$E_c = -\frac{\Delta\sigma_c}{\Delta\gamma_c}$$

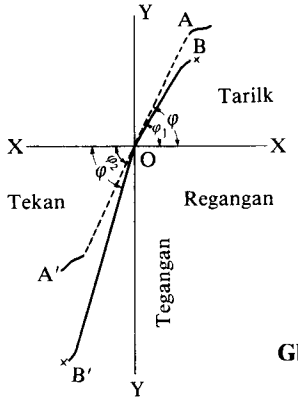
Kekuatan tekan σ_c didapat dari persamaan

$$\sigma_c = \frac{P_{\text{maks}}}{A}$$

P_{maks} adalah beban tekan maksimum (kgf) yang menyebabkan bahan hancur dan A adalah luas penampang asal (mm^2).

Ada beberapa resin termoplastik yang berdeformasi karena tekanan tetap tak hancur. Dalam hal ini dipergunakan beban mulur P_y sebagai pengganti beban P_{maks} atau kekuatan mulur P_y/A. Kekuatan tekan bahan polimer kira-kira 5–25 kgf/mm^2 pada temperatur kamar.

Kalau bahan polimer mengalami beban tekan tegangan tekan sangat berbeda dengan tegangan tarik. Ditunjukkan pada Gb. 3.11, untuk logam A A′ adalah garis lurus membentuk sudut yang dengan sumb X, sedangkan untuk bahan polimer garis BOB′ membentuk sudut $\phi_1 < \phi_2$, ini berarti bahwa modulus elastik untuk tekan lebih besar. Di samping itu kekuatan tekan bahan polimer umumnya 2–5 kali lebih besar dari kekuatan gesernya. Oleh karena itu kehancuran karena geseran lebih mudah daripada disebabkan tekanan. Kebanyakan resin termoset dan resin termoplastik termasuk bahan yang berdeformasi banyak, mulur tetapi tidak mudah patah. Sama seperti sifat-sifat lainnya, titik mulur, tegangan patah, modulus elastik untuk tekan berkurang dan regangan patah cenderung bertambah sesuai dengan naiknya temperatur dan kelembaban. Terutama, bahan termoplastik sangat dipengaruhi panas.



Gb. 3.11 Tekan dan tarik

1.2.4 Kekuatan impak

Kekuatan impak adalah suatu kriteria penting untuk mengetahui kegetasan bahan polimer. Pengujian impak Charphy, Izod dst, dalam hal ini umum dipakai. Untuk melihat pengaruh takikan ada cara pengujian dengan takikan pada batang uji.

Karena dalam beberapa kasus laju pembebanan tidak dapat ditetapkan dengan baik, maka perlu hati-hati dalam membandingkan hasil satu sama lain.

Umumnya kekuatan impak bahan polimer lebih kecil dari pada kekuatan impak logam. Kalau ikatan antar molekul kuat, atau berat molekul besar, kekuatan impak biasanya besar. Tetapi tidaklah sesederhana itu terjadi pada bahan sesungguhnya. Sebagai contoh, polietilen, yang berkristal dan mempunyai tarik menarik lemah antar-molekulnya tidak patah pada pengujian impak, hanya sekedar bengkok. Polisteren bersifat getas dan mudah patah karena berbentuk amorf dan tarik menarik yang lemah antara molekulnya. Bahan yang kaku dan ketahanan impaknya rendah banyak terdapat pada bahan termoplastik yang mempunyai titik transisi gelas tinggi. Sebagai contoh, polivinil khlorid sendiri tidak kuat, tetapi apabila dikopolimerkan dengan vinilasetat, dikopolimerkan atau dicampur dengan bahan serupa karet mempunyai titik transisi gelas rendah, kekuatan impaknya lebih baik. Pada poliamid, poliasetal dan lainnya yang disebut plastik industri, kekuatan impak berada pada daerah 5–33(kekuatan impak Izod, kgf·cm/cm^2; ditakik), sedangkan polikarbonat mempunyai kekuatan impak 65–95, kuat dan sangat kental. Keramik umumnya mempunyai kekuatan impack rendah kira-kira 0,2–0,7 sangat mudah patah, terkenal karena pengalaman sehari-hari. Bahan polimer kadang-kadang menunjukkan juga penurunan besar pada kekuatan impak kalau diberi regangan pada pencetakannya. Selanjutnya pada umumnya sifat-sifat yang diperlukan dapat diperbaiki kalau ditambahkan pengisi (*filler*) yang cocok ke dalam resin. Macam dan bentuk pengisi memberikan pengaruh banyak. Sedangkan pengaruh temperatur lebih rumit, yang menunjukkan harga maksimum pada temperatur tertentu, atau suatu peningkatan harga kalau temperatur itu naik. Harga impak itu menjadi besar dengan meningkatkan absorpsi kadar air dan menjadi kecil karena pengeringan. Kadang-kadang kadar air dapat memberikan pengaruh pemlastisan. Selanjutnya dalam bahan yang sangat mungkin membentuk sperulit atau bahan dengan butir kristal besar biasanya mempunyai harga impak kecil. Bahan dapat juga diperiksa dengan pengujian impak bola jatuh. Setiap hasil pengujian tidak selalu menunjukkan hubungan yang sama dengan kekuatan impak praktis, hal ini menyebabkan kerumitan cara-cara pengujian tersebut. Oleh karena itu perlu memilih cara mana agar memenuhi maksud pengujian masing-masing, baik pengujian Charphy, Izod atau dengan bola jatuh.

1.2.5 Kekerasan

Istilah kekerasan sering dipakai, tetapi sukar untuk mendefinisikannya secara tepat. Sementara dapat dikatakan bahwa kekerasan adalah "kriteria untuk menyatakan intensitas tahanan suatu bahan terhadap deformasi yang disebabkan objek lain." Ada tiga macam cara pengujian kekerasan yaitu: (1) pengujian penekanan, (2) pengujian goresan dan (3) pengujian *resilience* yang pada umumnya ditentukan dengan cara tak merusak.

Bahan polimer menunjukkan sifat kekerasan yang berbeda dibandingkan dengan logam karena sifat viskoelastiknya yang telah diterangkan di atas. Karena besarnya deformasi elastik dan pemulihan yang cepat, pada pengujian penekanan hasil kekerasan yang didapat lebih besar dari kekerasan seharusnya. Cara pengujian kekerasan tersebut dijelaskan di bawah ini:

(1) Kekerasan Rockwell

Kekerasan Rockwell (H_R) yang dipakai untuk menentukan kekerasan polimer adalah sebagai berikut: Mempergunakan bola sebagai penekan, beban mula P_0 diberikan untuk mendapat kedalaman mula, selanjutnya beban P diberikan untuk waktu tertentu (15 detik menurut standar ASTM) dan setelah dikembalikan ke beban

mula diukur kedalaman deformasi plastisnya (h, mm) yang disubstitusikan ke dalam persamaan.

$$H_R = 130 - 500\,h$$

Sekala kekerasan yang ditunjukkan pada Tabel 3.3. diperlukan, tergantung pada diameter bola dan beban yang diberikan. Menurut JIS dipakai sekala M dan R, dan menurut ASTM dipakai sekala K, E, L, M dan R. Dalam ASTM kekerasan α-Rockwell ditetapkan dengan beban di mana deformasi elastik diperhitungkan, kalau kedalaman penekanan karena deformasi $\bar{h}$ mm maka

$$\alpha\text{-}H_R = 150 - 500\,\bar{h}$$

Tabel 3.4 menunjukkan beberapa contoh: Kadang-kadang kekerasan di permukaan berbeda dengan kekerasan di dalam bahan. Kekerasan bahan dipertinggi oleh kuatnya ikatan antar molekul, tingginya kristalinitas dan ikatan silang maupun struktur tiga dimensi.

(2) Kekerasan Durometer dan kekerasan Barcol

Barang karet dihasilkan dalam berbagai kekerasan yang ditentukan oleh macam bahan, cara vulkanisasi dan bahan campuran, oleh karena itu kekerasan merupakan kriteria untuk menentukan keadaan karet. Durometer, secara international mempunyai penekan berbentuk tertentu dengan diameter $0{,}787 \pm 0{,}025$ mm pada

Tabel 3.3 Kekerasan Rockwell, perincian tiap skala.

Skala	Beban mula P_0 (kg)	Beban Uji P (kg)	Diameter penekan.	
			inci	mm
R	10	60	1/2	12,7
L	10	60	1/4	6,35
M	10	100	1/4	6,35
E	10	100	1/8	3,175
K	10	150	1/8	3,175

Tabel 3.4 Kekerasan plastik (Rockwell).

Plastik	Cara pengujian	Harga
Resin fenol		
Diisi dengan bubuk kayu	D785	M100-M120
Diisi dengan asbes	Rockwell	M95-M115
Resin urea		M110-M120
Resin melamin		M110-M125
		M70-M120
Resin silikon		
Resin epoksi		
Resin akrilik		M85-M105
Poliviniliden klorida		M50-M65
Polistiren		M35-M80
Resin ABS		R30-R118
Resin AS		M80- M90
Polipropilen		R85-R110
Poliamid		R111-R118
Poliasetal		M80-M90
Polikarbonat (FR)		M93
Polisulfon		M95

ujungnya), ditekankan pada bahan pada tekanan seimbang dengan pegas, lenturan pegas dapat dibaca pada sekala. Kekerasan Barcol diukur dengan prinsip yang serupa hanya berbeda bentuk penekan. Keduanya mempunyai penekan yang kecil.

(3) Kekerasan Vickers

Kekerasan Vickers penting bagi ketelitian kekerasan logam, dsb. Untuk bahan polimer dipergunakan juga cara serupa, memakai beban penekanan P, 100–200 g, kekerasan Vickers (H_V) didapat dari persamaan di bawah. Kekerasan tersebut dapat dibandingkan dengan kekerasan bahan logam. Akan tetapi dalam hal ini memperhatikan kenyataannya bahwa kelakuan viskoelastik bahan polimer adalah aneh.

$$H_v = 1{,}854\frac{P}{d_m^2}$$

di mana d_m adalah panjang rata-rata garis diagonal bekas penekanan oleh penekan paramida intan (*diamond*).

1.2.6 Ketahanan aus dan gesekan

Sejak penggunaan plastik untuk keperluan industri masa kini sangat besar, sifat tersebut di atas merupakan sifat penting. Bahan polimer sukar untuk dipasang tanpa pelumas, tapi karena hantaran termalnya yang jelek, dapat terpasang dan bersatu apabila temperatur bidang geseknya meningkat, atau kalau terdeformasi oleh beban berat. Untuk mengetahui sifat tersebut telah diadakan studi pada resin termoplastik, seperti poliamid, poliasetal, politetrafluoroetilen, polikarbonat dan bahan termoset seperti resin fenol.

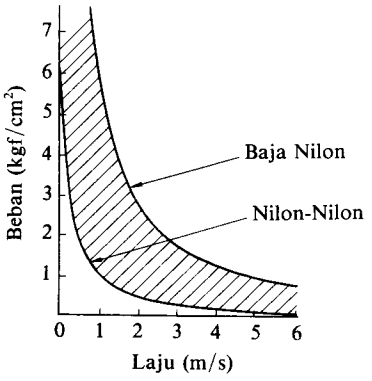
Mekanisma gesekan pada bahan polimer sangat berbeda dengan mekanisma pada logam. Pada logam, koefisien gesekan hampir konstan tidak tergantung beban, luas bidang kontak laju gesekan, di mana hukum Coloumb biasanya berlaku. Tetapi pada bahan polimer koefisien gesekan tergantung beban, bidang kontak, dan seterusnya. Umumnya cenderung berkurang kalau beban bertambah, karena bahan menunjukkan kelakuan tengah-tengah antara deformasi elastik dan deformasi plastik. Hubungan antara gaya gesek (F) dengan beban P, $(F) \propto P^{0,74}$ berlaku untuk nilon dan polietilen. Untuk polivinil khlorid:

$$F = SA_n\{1 - \text{eks}(-KP)\}$$

di mana
- F: Gaya gesek
- S: Kekuatan geser
- A_n: Bidang kontak
- K: Konstanta
- P: Beban

Hubungan tersebut mempunyai kecenderungan tidak meningkat apabila melewati titik transisi gelas ($T_g = 75°C$). Untuk gesekan dengan karet hubungan W. L. F dapat dipakai antara temperatur dan laju gesekan. Dalam ASTM-D 1894–1973 dan D 3028–1972 ditentukan cara pengujian gesekan.

Abrasi antara bidang merupakan hal yang penting apabila bahan polimer dibuat benda yang bergesekan. Mengingat hantaran termal yang jelek, temperaturnya naik karena panas gesekan, dan bagi bahan termoplastik hal ini disebabkan penambahan fluks. Karena ketahanan panasnya kurang dibandingkan dengan logam dan keramik,



Gb. 3.12 Cair oleh panas gesekan.

maka permukaannya dilelehkan oleh bertambahnya beban dan laju gesekan, yang menyebabkan bahan tidak dapat dipakai. Hubungan antara tekanan pada bidang (P) dan laju gesekan (V) ditunjukkan dalam Gb. 3.12, untuk nilon, sebagai contoh. Umumnya merupakan garis hiperbola pada PV=tetap. Ini suatu kasus untuk waktu yang singkat. Kalau dilakukan dalam waktu lama maka digunakan P dan V yang jauh lebih kecil. Tentu saja harga P dan V berubah tergantung temperatur sekelilingnya dan radiasi panas. Seperti telah dikemukakan di atas bahan polimer memiliki ketahanan panas yang kurang, yang membolehkan penggunaan P dan V pada daerah harga yang sempit, tetapi masih berada dalam daerah sifat-sifatnya yang diinginkan.

Suatu hubungan dapat ditentukan antara abrasi (W), beban (P) dan jarak gesek (S):

$$W=PKS$$

di mana K merupakan konstanta proporsional. Gb. 3.13 menunjukkan perbandingan antara abrasi spesifik, yang dinyatakan dalam abrasi voleme (mm^3) terhadap beban (per kg) dan jarak luncur (per mm). Hal tersebut dapat dipakai sebagai suatu petunjuk. Penggunaan bahan pengisi mengakibatkan kelakuannya berubah banyak. Hasil yang memuaskan didapat dengan menambahkan bahan pengisi berupa serat gelas pada politetrafluoroetilen; grafit, molibdin disulfit, serat Telfon, serat karbon pada nilon dan poliasetal.

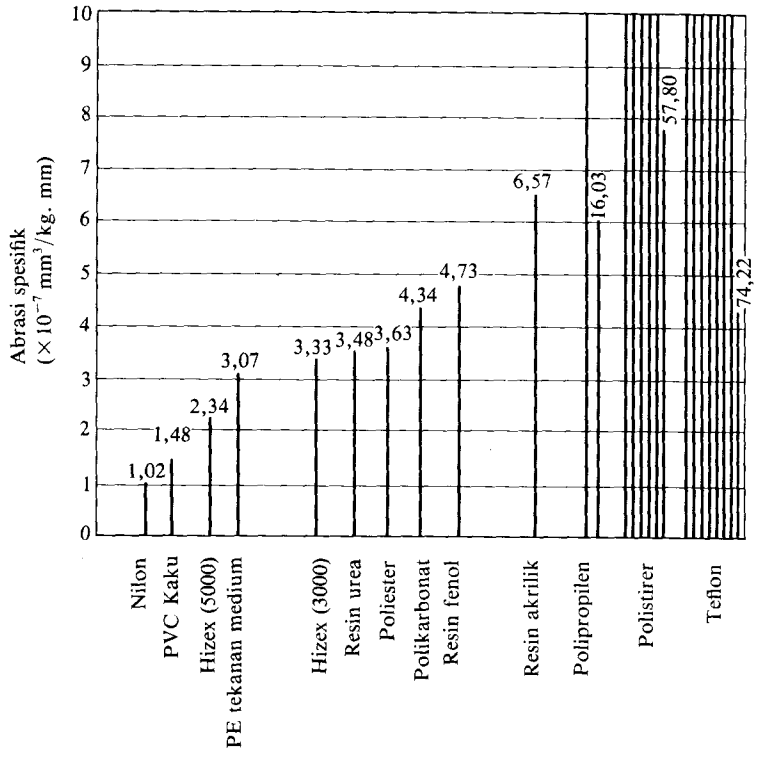
Abrasi karena kekasaran permukaan disebabkan pengampelasan atau butir lain, berbeda dengan abrasi pada permukaan rata. Abrasi lebih hebat pada poliester keras yang tidak junuh, sedangkan pada nilon dan polietilen lunak, kurang. Pada kekerasan yang serupa bahan yang lebih liat menunjukkan keunggulannya dalam sifat abrasinya. Dalam JIS-K 7024 dipakai penguji abrasi tipe tirus. Dalam JIS-K 7205 dipakai penguji abrasi tipe Olsen yang disebut dalam ASTM-D-1242-1956-(A). ASTM-D-1242-1956-(B) adalah penguji abrasi tipe Armstrong.

Abrasi merupakan hal penting pada bahan karet yang dipergunakan sebagai bahan ban mobil, dst. Perlu dicatat mengenai ketahanan abrasi, tidak selalu sama tergantung pada cara pengujian. Ketahanan abrasi ternyata berturut-turut lebih baik mulai dari karet alam, SBR, NBR, CR dan IIR.

Karet uretan bahan yang sangat baik. Jenis dan perbadingan campuran karbon memberikan pengaruh besar. Umumnya HAF memberikan pengaruh yang baik

1.2.7 Ketahanan lelah

Pembebanan luar yang diberikan berulang-ulang kepada bahan lebih cepat



Alat uji: Penguji abrasi cepat Ohgoshi
Laju: 0,208 m/sec
Jarak gesek: 100 m
Beban akhir: 3,3 kg

Gb. 3.13 Abrasi spesifik dari plastik.

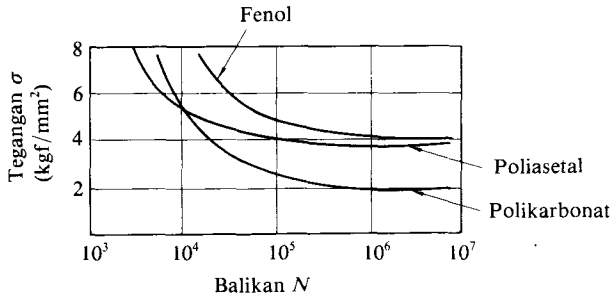
mengalami patah. Gejala ini disebut kelelahan yang merupakan sifat penting dalam penggunaan bahan. Kelelahan biasanya dinyatakan dengan tegangan maksimum bolak-balik untuk sejumlah balikan tegangan. Bentuk tegangan dalam kelelahan adalah tarik, tekan tekuk (lentur), puntir dan kombinasinya. Terutama kombinasi tarik dan tekan memberikan pandangan yang lebih jauh.

Kelelahan dipengaruhi oleh beberapa faktor. Kalau temperatur naik ketahanan lelah turun. Pengaruh laju balikan (frekwensi) terbatas sampai harga tertentu, tetapi apabila dibandingkan pada banyak balikan serupa, kelelahan lebih cepat terjadi pada laju balikan rendah. Bentuk batang uji juga memberikan beberapa pengaruh. Perlu cukup pertimbangan kalau akan dipakai untuk keperluan praktis. Berbagai alat uji kelelahan untuk karet telah ada. Kelelahan adalah sifat yang sangat penting bagi setiap macam bahan dalam pemakaian praktis. Karena memerlukan waktu pada pengukuran dan hasil yang didapat biasanya berfluktuasi, maka diperlukan usaha keras untuk mendapatkan hasil pengujian yang bisa diandalkan. Tabel 3.5 menunjukkan kekuatan kelelahan untuk berbagai plastik. Data ini didapat melalui cara pengujian lentur pada batang sederhana yang ditumpu. Kalau dipakai cara dan laju yang berlainan, hasilnya tidak selalu sama, karena itu perlu dicatat. Cara pengukuran ditentukan dalam JIS-K7118-1972, K7119-1972 dan ASTM-D647-1968.

Gb. 3.14, menunjukkan kurva tegangan σ vs balikan N, masing-masing berada lebih rendah atau sekitar 10^6–10^7 balikan, berbeda dari bahan logam.

Tabel 3.5 Kekuatan kelelahan plastik.

Resin	Kelelahan at 10^7 (kg/mm^2)	Kelelahan / Perpanjangan α	Kelelahan / Lentur β
Resin termoset:			
Poliester tak jenuh:			
Kain gelas tenunan satin	9,0	0,22	—
Kain gelas tenunan biasa	7,0	0,33	—
Tikar gelas	3,0	0,47	—
Dikasarkan	1,6	0,4	—
Resin fenol:			
Kain gelas tenunan satin	12,0	0,31	—
Kain katun dengan bilangan benang rendah	2,5	0,33	—
Kertas	2,5	0,29	—
Resin epoksi:			
Kain gelas tenunan satin	15,0	0,37	—
Kain gelas satu arah	25,0	0,44	—
Coran	1,6	0,27	—
Resin termoplastik			
Polivinil klorida	1,7	0,29	0,15
Polistiren	1,02	0,41	0,20
Nilon	1,20	0,22	0,24
Polietilen	1,12	0,50	0,40
Polikarbonat	1,00	0,15	0,09
Polipropilen	1,12	0,34	0,23
Polimetil metakrilat	2,83	0,35	0,22
Resin asetal	2,74	0,37	0,25
Resin ABS	1,2	0,30	—



Gb. 3.14 Kurva kelelahan σ-N putar lentur.

1.3 Sifat-sifat termal

Sifat khas bahan polimer sangat berubah oleh perubahan temperatur. Hal ini disebabkan apabila temperatur berubah, pergerakan molekul karena termal akan mengubah kumpulan molekul atau merubah struktur (terutama struktur yang berdimensi besar). Selanjutnya, karena panas, oksigen dan air bersama-sama memancing reaksi kimia pada molekul-molekul, terjadilah depolimerisasi, oksidasi, hidrolisa dan seterusnya, yang lebih hebat terjadi pada temperatur tinggi. Keadaan tersebut jelas akan mempengaruhi sifat-sifat: mekanik, listrik, dan kimia. Pada kesempatan

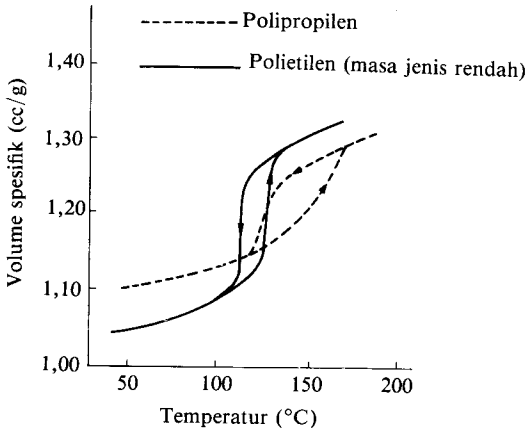
ini, dalam daerah terbatas dari sifat-sifat termalnya akan dibahas mengenai: hantaran termal, kapasitas termal dan panas jenis, koefisien pemuaian sebagai akibat dari pergerakan molekul oleh panas dan temperatur transisi gelas (T_g) yang berupa indeks penting bagi bahan, titik cair (T_m), titik lunak dan ketahanan panas.

1.3.1 Koefisien pemuaian termal

Koefisien pemuaian panjang karena panas adalah sederhana apabila bahan bersifat isotropi, tapi apabila struktur bahan berbeda di setiap arah maka diperlukan suatu pertimbangan khusus. Jadi pada setiap pembahasan koefisien pemuaian panjang perlu diingat bahwa bahan polimer sering dibuat anisotropi pada proses pembuatannya. Serat dan film yang jelas dibuat anisotropi perlu diberi tanda pada arah yang bersangkutan, perlu pula diingat bahwa pada film dan serat sering terjadi penyusutan karena panas, karena apabila temperatur naik, cara pengumpulan molekul berubah oleh pergerakan termal dari molekul. Selain itu keadaan yang lebih rumit telah diketahui seperti ikatan silang progresif atau dehidrasi.

Hubungan antara volume jenis dan temperatur polietilen dan polipropilen ditunjukkan dalam Gb. 3.15. Suatu perubahan yang jelas terjadi pada pelelehan kristal berupa hiterisis. Perubahan lain terjadi pada titik transisi gelas (T_g). Terutama bagi bahan polimer yang amorf perubahan T_g adalah khas. Dari hasil pengamatan tersebut, jelas bahwa hubungan antara volume jenis dan temperatur tidak lurus yang berarti bahwa koefisien pemuaian panjangnya juga berubah oleh kenaikan temperatur. Umumnya koefisien pemuaian lebih besar pada temperatur lebih tinggi.

Tabel 3.6 menunjukkan koefisien pemuaian panjang bahan polimer, yang berubah karena berbagai keadaan. Polietilen bercabang dengan kristalinitas rendah mempunyai koefisien lebih besar. Polivinil klorid dengan pengisi juga mempunyai koefisien lebih besar. Pada kopolimer harga tersebut berubah tergantung pada perbandingan kopolimerisasi dan banyaknya zat pemlastis yang dibubuhkan. Kalau pengisi dengan harga koefisien pemuaian yang rendah dicampurkan, maka koefisien untuk resin menjadi lebih kecil. Pada nilon berkristal, kalau kristalinitasnya besar, harga koefisien muainya kira-kira $6\times10^{1-5}/°C$ kalau kristalinitasnya kecil menjadi kira-kira $10\times10^{1-5}/°C$, yang lebih besar daripada harga koefisien muai untuk logam dan keramik. Pada F. R. P. koefisien muainya pada arah serat dapat dibuat kecil oleh serat gelas.



Gb. 3.15 Hubungan antara volume spesifik dan temperatur.

Tabel 3.6 Koefisien pemuaian panjang bahan polimer.

Polimer	Koefisien pemuaian panjang/°C × 10^{-5}
Polietilen (masa jenis rendah)	16–18
Polietilen (masa jenis medium)	14–16
Polietilen (masa jenis tinggi)	11–13
Polipropilen	6–10
Polistirene	6–8
ABS (tahan impak)	9–10
ABS (tahan panas)	6–8
Polivinil klorida	5–18
Polivinil klorid (dengan pemlastis)	7–25
Polikarbonat	7
Poliamid (Nilon 6)	8
Poliamid (Nilon 66)	8
Poliamid (Nilon 6 11)	9
Polimetil metakrilat	5–9
Politetrafluoroetilen	10
Poliasetal	8
Polisulfon	5,6
Resin Fenol (diisi bubuk kayu)	3–4,5
Resin fenol (diisi asbes)	0,8–4
Resin fenol (diisi serat gelas)	0,8–1,6
Resin melamin (diisi asbes)	2–4,5
Resin urea (diisi α-selulosa)	2–4
Resin epoksi (tanpa pengisi)(coran)	4,5–6,5
Resin epoksi (diisi silika)(coran)	2,0–4,0
Resin poliester (tanpa pengisi)(coran)	5,5–10
Resin poliester (diisi organik) (dicetak)	3,5–5
Resin silikon (diisi anorganik)	2–4

1.3.2 Panas jenis

Panas jenis bahan polimer kira-kira 0,25–0,55 cal/g/°C, yang lebih besar dibandingkan dengan bahan logam, juga lebih besar dibandingkan dengan keramik. Hal ini disebabkan karena panas jenis adalah panas yang diperlukan untuk pergerakan termal dari molekul-molukul dalam strukturnya, sedangkan energi kenetik termal dari molekul lebih besar dari energi relaksasinya kisi kristal. Tabel 3.7 menunjukkan panas jenis beberapa bahan polimer. Perbedaan pada harga tergantung pada perbedaan kom-

Tabel 3.7 Panas jenis bahan polimer.

Polimer	Panas jenis (cal/°C)
Polietilen	0,55
Polipropilen	0,46
Polistiren	0,32
ABS	0,3–0,4
Polivinil klorida	0,2–0,3
Polikarbonat	0,30
Poliamid (Nilon 6, Nilon 66)	0,4
Polimetil metakrilat	0,35
Politetrafluoroetilen	0,25
Poliasetal	0,35

Tabel 3.8 Energi dalam kalori dan panas laten pelelehan yang diperlukan pada pencetakan.

Resin	Temperatur pencetakan (°C)	Kalori (kcal/kg)	Panas laten pelelehan (kcal/kg)
Poliasetal	205	100	39
Polistiren	235	88	0
Polietilen (masa jenis tinggi)	227	172	38
Nilon 66	277	189	31

posisi. Suatu perubahan diharapkan terjadi karena pengisi. Karena panas jenis diperlukan untuk perhitungan panas pada percetakan dan proses pendinginannya, sebagai petunjuk pada Tabel 3.8 dinyatakan panas yang diperlukan untuk pencetakan dan panas laten pelelehan.

1.3.3 Koefisien hantaran termal

Koefisien hantaran termal adalah harga yang penting bagi bahan polimer sehubungan dengan panas pencetakan dan penggunaan produknya. Mekanisma penghatar panas pada bahan polimer juga merupakan akibat propagasi panas pergerakan molekul.

Cara terjadinya formasi kristal dengan adanya daerah amorf dan seterusnya, pada dasarnya berbeda dengan bahan lain, yang menunjukkan harga rendah dibandingkan dengan bahan logam dan keramik. Kira-kirra 10^{-3}–10^{-4} (cal/detik/cm^2/°C/cm).

Data mengenai koefisien hantaran termal bagi bahan polimer lebih sedikit karena pengukurannya yang agak sukar dilakukan. Tabel 3.9 menunjukkan beberapa contoh. Pada bahan polimer berkristal seperti polietilen, hantaran panasnya menjadi lebih baik kalau kristalinitasnya menjadi lebih besar (masa jenisnya lebih besar juga). Kalau strukturnya menjadi anisotropik seperti pada serat dan film, koefisien hantaran termal pada arah kerangka molekul yang tersusun oleh molekul rantai, menjadi agak lebih besar. Kalau diisi dengan serat gelas, silika atau pengisi bahan organik lainnya, hantaran termal menjadi lebih baik.

Bahan polimer sering diproses untuk menghasilkan bahan isolasi panas. Sebagai contoh koefisien hantaran termal bahan busa polimer ditunjukkan pada Tabel 3.10. Koefisien hantaran termal berubah karena gelembung-gelembung di dalam busa berhubungan atau bebas satu sama lain, macam gas dalam gelembung, ukuran gelembung, fraksi volume, dan seterusnya. Kalau masa jenisnya kecil, yaitu kalau volume gas busa besar, koefisien hantaran termal kecil maka akan memberikan pengaruh isoloi termal lebih besar. Kalau gelembung-gelembung lebih kecil masih di dalam daerah yang tidak menyebabkan konveksi pada udara pengisi gelembung, maka pengaruh isolasi panas diharapkan menjadi lebih besar.

1.3.4 Titik tahan panas

Kalau temperatur bahan polimer naik, pergerakan molekul menjadi aktif ke titik transisi, yang menyebabkan modulus elastik dan kekerasannya rendah, sedangkan tegangan patahnya lebih kecil dan perpanjangannya lebih besar. Serempak dengan itu, sifat listrik, ketahanan volume, tegangan putus dielektrik dan seterusnya menjadi kecil

Tabel 3.9 Koefisien hantaran panas polimer.

Polimer	Koefisien hantaran panas kal/det/cm²/(°C/cm) $\times 10^{-4}$
Polietilen (masa jenis rendah)	8
Polietilen (masa jenis medium)	10
Polietilen (masa jenis tinggi)	11–12
Polipropilen	3
Polistiren	2–3
ABS (tahan impak)	4–8
ABS (tahan panas)	4–8
Polivinil klorida	3–7
Polikarbonat	4–5
Poliamid (Nilon 6)	5,85
Poliamid (Nilon 66)	5,85
Poliamid (Nilon 610	5,16
Polimetil metakrilat	4–6
Politetrafluoroetilin	6
Poliasetal	5,5
Polisulfon	6,2
Resin fenol (diisi bubuk kayu)	4–7
Resin fenol (diisi asbes)	8–22
Resin fenol (diisi serat gelas)	9–15
Resin melamin (diisi asbes)	13–17
Resin urea (diisi α-selulosa	7–10
Resin epoksi (tanpa pengisi) (coran)	4–5
Resin epoksi (diisi silika) (coran)	10–20
Resin poliester (tanpa pengisi) (coran)	4
Resin poliester (diisi organik) (dicetak)	12–25
Resin silikon (diisi anorganik)	11–13

Tabel 3.10 Koefisien hantaran panas busa polimer.

Polimer	Koefisien hantaran panas kal/det/cm²/(°C/cm) $\times 10^{-5}$
Busa poliuretan fleksibel	9–10,5
Busa poliuretan kaku	4–6
Busa polistiren	9–
Busa polietilen	10–

Tabel 3.11 T_m, T_g dan T_m/T_g.

Polimer	T_m(°C)	T_g(°C)	T_g(°K)/T_m(°K)
Polietilen	105–115	−68	~0,53
Polimetilen	132	(+20)	(0,72)
Polivinil klorida	(100)	+80	0,95
Poliviniliden klorida	190	−17	0,55
Politetrafluoroetilen	327	20	0.49
Silikon	−58	−123	0.71
Karet alam	(30)	−73	(0.66
Nilon 66	256	<40	0.60
Nilon 6	223	(49)	(0.54
Poliuretan	185	(−20)	0.55
Polietilen terèftalate	264	67	0.54

dan pada umumnya konstanta dielektrik menjadi besar. Kalau temperatur melewati titik transisi, bahan amorf (termoplastik) seperti karet menjadi lunak, dan selain perubahan pada sifat-sifat di atas modulus elastiknya juga tiba-tiba berubah. Selanjutnya, pada temperatur tinggi bahan berkristal, kristalnya meleleh dan dapat mengalir. Tabel 3.11 menunjukkan titik transisi pada temperatur (T_g) dan titik cair (T_m) untuk bahan polimer. T_g adalah temperatur yang terutama menyangkut daerah amorf, perubahan sifat-sifat fisik pada T_g besar kalau volume daerah amorf tersebut lebih besar. Di bawah T_g bahan menunjukkan keadaan seperti gelas, yang berubah ke keadaan seperti karet atau kulit di atas temperatur T_g. Panas jenis, koefisien muai, sifat mekanik dan seterusnya biasanya berubah, oleh karena itu perlu mengetahui T_g terlebih dahulu sebelum pemakaian bahan tersebut. T_g berubah disebabkan perubahan struktur molekul di dalam bahan, macam, kadar air, bahan pemlastis dan seterusnya.

Titik cair (T_m) merupakan faktor penting bagi polimer termoplastik berkristal, yang ada hubungannya dengan ukuran kristal, kesempurnaan, struktur molekul, gaya antar molekul, dan seterusnya. Secara termodinamika dapat dinyatakan:

$$T_m = \frac{\Delta H}{\Delta S}$$

di mana ΔS dan ΔH masing-masing entropi dan entalpi pada pencairan. Karena itu bahan polimer yang terdiri dari molekul rantai dengan ΔH besar (gaya antar molekul kuat) dan ΔS kecil (molekul tidak fleksibel), mempunyai titik cair tinggi. Sebagai contoh poli-parafenilen tereftalamid (Kevlar) mempunyai T_m yang sangat tinggi. Sebaliknya bahan dengan ΔS besar dan ΔH kecil seperti karet alam, titik cairnya sangat rendah.

Sangat sukar untuk menelaah ketahanan panas bahan polimer pada temperatur tinggi, sebab banyak sekali faktor yang akan memberikan pengaruh tertentu seperti keadaan lingkungan, bentuk bahan, macam dan jumlah pengisi, adanya bahan penyetabil dan seterusnya. Lamanya waktu berada pada temperatur tinggi juga merupakan persoalan. Dalam waktu yang singkat pada temperatur tinggi tidak memberikan perubahan banyak, tetapi dalam waktu yang lama walaupun temperaturnya lebih rendah dapat mengakibatkan kerusakan. Jadi persyaratan tertentu perlu dipertimbangkan bagi bahan tertentu, umpamanya, sampai sejauh mana degradasi termal dapat merusak fungsi tertentu suatu bahan dan seterusnya. Untuk mudahnya, temperatur ketahanan panas yang dipakai untuk waktu lama dinyatakan dalam Tabel 3.12. Dalam tabel ini, deformasi tidak menjadi pertimbangan. Kalau deformasi dinyatakan sebagai salah satu faktor degradasi, maka dalam hal ini diperlukan perhatian. Perubahan warnanya juga berubah oleh keadaan. Apabila perubahan tersebut harus dihindari maka dalam hal ini perlu mendapat perhatian.

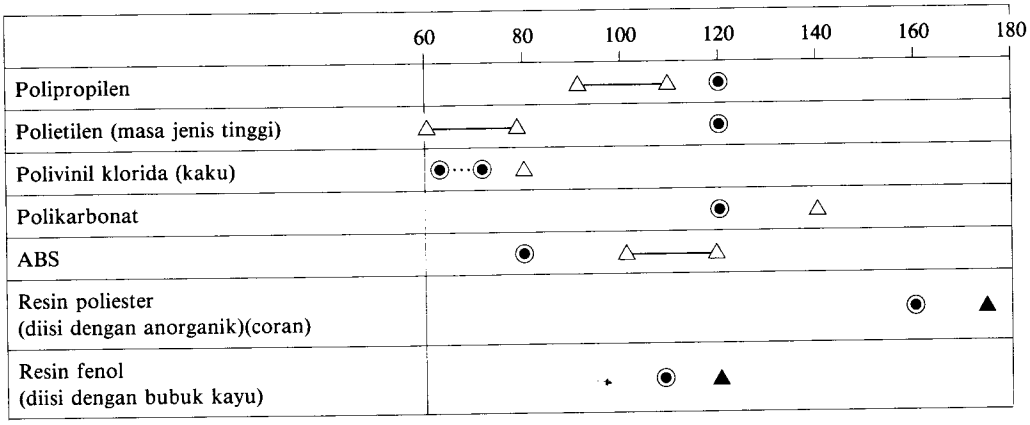
Temperatur deformasi termal diukur sesuai dengan cara pengujian standar yang ditentukan dalam JIS dan ASTM, yang dinyatakan dalam suatu harga di mana diberikan beban masing-masing 4,6 kg/cm^2 (66 psi) atau 18,5 kg/cm^2 (264 psi). Tabel 3.13 menunjukkan hasil pengujian tersebut.

Kalau bahan disebut mempunyai temperatur deformasi lebih tinggi, resin silikon pada 316–428°C dan poliamid pada 343°C, sesungguhnya batas tertinggi kira-kira 280°C untuk waktu yang lama. Pada umumnya temperatur deformasi termal untuk resin termoset kira-kira 200°C paling tinggi. Batas terendah dipunyai oleh PVC yang kaku yaitu pada 54–74°C dan oleh polietilin yang bermasa jenis rendah yaitu pada 41–49°C. Resin termoplastik umumnya mempunyai harga lebih rendah kecuali bila mempunyai titik cair kristal (T_m) yang tinggi dan mempunyai kristalinitas tinggi.

Tabel 3.12 Ketahanan panas polimer (kontinu).

Polimer	Ketahanan panas (°C)
Polietilen (masa jenis rendah)	80–100
Polietilen (masa jenis medium)	105–120
Polistiren	65–75
ABS (tanah impak)	75–
ABS (tahan panas)	85–
Polivinil klorida	65–75
Polivinil klorid (dengan pemlastis)	65–75
Resin fenol (diisi dengan serat gelas)	150
Resin melamin (diisi dengan α-selulosa)	100
Resin melamin (diisi dengan asbes)	160
Resin urea	75
Resin epoksi (tanpa pengisi) (dikur dengan amin)	90
Resin epoksi (tanpa pengisi) (diukur dengan asam anhidrid)	130
Polietilen (masa jenis tinggi)	~120
Polipropilen	~120
Resin poliester (tanpa pengisi) (coran)	120
Resin poliester (diisi dengan anorganik) (cetakan)	160
Polikarbonat	120
Poliamid (Nilon 66)	80
Polimetil metakrilat	60–85
Politetrafluorotilen	250
Poliasetal (Homo)	85
Poliasetal (Ko)	100
Polisulfon	170
Resin fenol (diisi dengan bubuk kayu)	115
Resin fenol (diisi dengan asbes)	150

Tabel 3.13 Temperatur ketahanan panas kontinu dan temperatur distorsi panas bahan polimer.



◉: Temperatur ketahanan panas kontinu
△: Temperatur distorsi panas (ASTM prategangan 66 psi)
▲: Temperatur distorsi panas (ASTM prategangan 264 psi)

1.4 Sifat-sifat listrik

Banyak di antara bahan polimer sukar dilalui arus listrik dan tahan terhadap medan listrik, oleh karena itu sering dipakai sebagai isolator listrik. Kalau bahan

isolator berada pada suatu tegangan listrik, terjadi polarisasi, yang disebabkan oleh gerakan pembawa muatan seperti ion, elektron dan seterusnya dan perpindahan elektron, atom, dipol, dst., di dalam bahan.

Listrik dihantar oleh gerakan pembawa muatan, oleh karena itu bahan yang memiliki gerakan lamban dan pembawa yang kurang banyak merupakan isolator listrik yang baik. Kalau tegangan tinggi diberikan, hantaran listrik dipercepat, yang menghasilkan lubang-lubang menembus isolator atau mengarbonkannya menjadi rusaknya dielektrik. Polarisasi menginduksikan muatan positip dan negatip pada bagian muka dan belakang dari bahan, dan menyimpan energi statik. Konstanta dielektrik adalah sejumlah energi elektrostatik serupa itu. Tahanan dan kekuatan dielektrik yang menyangkut gerakan pembawa muatan disebut mutu isolasi, sedangkan konstanta dielektrik dan kerugian dielektrik yang menyangkut polarisasi disebut sifat-sifat dielektrik.

1.4.1 Kekuatan hancur dielektrik

Sejauh mana suatu isolator bisa bertahan terhadap tegangan listrik tergantung pada kekuatan hancur dielektrik dan kekuatan dielektrik. Yang pertama merupakan tegangan listrik minimum untuk merusak suatu isolator, yang dinyatakan oleh tegangan hancur dibagi oleh tebalnya isolator pada saat rusak dan yang kedua adalah tegangan listrik maksimum di mana bahan masih bertahan, yang mempunyai arti tegangan yang dijamin aman bagi produk. Kebanyakan dari kekuatan hancur dielektrik yang sebenarnya dipunyai oleh bahan polimer merupakan kekuatan hancur termal.

Kekuatan hancur dielektrik berkurang karena tebalnya bertambah, ternyata harga tersebut lebih tinggi pada bagian yang tipis. Ada hubungan antara kekuatan hancur dielektrik E (kV/mm) dan ketebalan d (mm), yaitu $E=Ad^{-n}$, di mana A dan n masing-masing adalah macam benda uji dan konstanta dari keadaan yang diukur. Harga n mendekati nol untuk arus searah dan umumnya 0,3–0,5 untuk arus bolak-balik. Tabel 3.14 menunjukkan hubungan tersebut.

Selanjutnya, kekuatan hancur dielektrik berubah banyak dipengaruhi lingkungannya. Kalau tegangan hancur dielektrik suatu media sekeliling isolator besar, dan konstanta dielektriknya besar maka kekuatan hancur dielektriknya menjadi besar. Hal ini terutama jelas ditunjukkan pada arus bolak-balik. Pada arus searah harga tersebut lebih berfluktuasi sedangkan pada arus bolak-balik kurang, dan berbeda apabila berada dalam media minyak dan udara. Polimer non-polar dengan konstanta dielektrik kecil seperti polietilen, polistiren, dst., mempunyai harga lebih besar di

Tabel 3.14 Hubungan antara kekuatan hancur dielektrik dengan ketebalan.

Film	Ketebalan (mm)	Kekuatan hancur dielektrik (kVeff/0,1 mm)
Polietilen tekanan tinggi	0,038	18,8
	0,10–0,18	7,2
	0,25–0,38	5,6
Polietilen tereftalat	0,025	24,0
	0,038	21,8
	0,051	18,8
Teflon	0,20	6,0
	1,5	3,6

(50 Hz, di udara pada temperatur biasa)

Tabel 3.15 Perubahan isolasi oleh absorpsi air.

Resin	Absorpsi air (%)	Ketahanan volume (Ωcm)		Kekuatan hancur di elektrik (kV/mm)	
		Keadaan biasa	dicelup di air	Keadaan biasa	dicelup di air
Resin termoplastik:					
Polietilen	0,01	10^{16}	10^{16}	—	—
Polipropilen	0,01	10^{16}	10^{16}	—	—
Polistiren	0,03	10^{16}	10^{16}	—	—
Polivinil klorid (kaku)	0,07–0,4	10^{16}	10^{15}	—	—
Politetrafluoroetilen	0,005	10^{16}	10^{16}		
Polietilen tereftalat	1,0	10^{16}	10^{15}	—	—
Polikarbonat	0,3–0,6	10^{16}	10^{15}	—	—
Resin coran:					
Resin fenol	0,5–0,8	$4{,}0\times10^{15}$	$2{,}5\times10^{14}$	90	78
Resin alil	0,5	$6{,}5\times10^{14}$	$4{,}5\times10^{13}$	75	65
Resin poliester tak jenuh	0,3–0,5	$2{,}8\times10^{15}$	$1{,}0\times10^{14}$	88	82
Resin epoksi	0,1–0,2	$4{,}5\times10^{15}$	$3{,}1\times10^{15}$	98	92
Resin poliuretan	0,2—0,4	$1{,}8\times10^{15}$	$4{,}9\times10^{14}$	90	83

dalam air daripada di dalam udara. Beberapa polimer polar seperti polietilen tereftalad dan polikarbonat mempunyai harga lebih rendah di dalam minyak. Kekuatan hancur dielektrik dari bahan polimer pada umumnya berkurang kalau tempertatur dinaikkan, demikian juga halnya terhadap kadar air. Oleh sebab itu, tanpa perlakuan yang cukup untuk menghilangkan bahan higroskopik dari berbagai bahan yang dipakai untuk polimer seperti perekat, kekuatan tersebut sangat berkurang karena absorpsi air. Selanjutnya pada tegangan AC untuk waktu lama, bahan rusak walaupun tegangan rendah. Tabel 3.15 memperlihatkan hubungan antara absorpsi air dan kekuatan hancur dielektrik.

1.4.2 Tahanan isolasi

Kalau tegangan DC diberikan pada isolator yang terbuat dari bahan polimer, arus listrik lewat melalui bagian dalam dan permukaannya. Perbandingan tegangan DC yang diberikan dan arus listrik total disebut tahanan isolasi, antara tegangan dengan arus listrik dalam (arus volume) disebut tahanan volume, dan antara tegangan dengan arus permukaan disebut tahanan permukaan. Selanjutnya, tahanan volume per satuan tebal dan per satuan luas disebut ketahanan volume (Ω cm), sedangkan tahanan permukaan per satuan jarak permukaan, yaitu satuan panjang dari elektroda disebut ketahanan permukaan (Ω).

Kalau tegangan DC diberikan pada bahan polimer, arus volume berkurang dengan berjalannya waktu sampai harga tertentu setelah waktu yang lama. Oleh karena itu biasanya di dalam standar pengujian bahan dipakai waktu satu menit setelah dimulai. Selama tegangannya rendah, hukum Ohm berlaku untuk arus tersebut, tetapi kalau tegangan lebih besar, arus listrik bertambah dan dipercepat, maka hukum tersebut tidak berlaku. Perubahan karena temperatur mendekati persamaan Arrhenius: $\rho = Ae^{\Delta H/RT}$, di mana ρ adalah ketahanan volume, T temperatur mutlak, R konstanta gas, ΔH energi aktivasi dari hantaran listrik, yang kecil pada polietilen (13 kcal/mol) dan besar pada nilon (40–48 kcal/mol) demikian juga pada

Tabel 3.16 Ketahanan volume bahan polimer.

Polimer	Ketahanan volume (Ωcm)/0 rad
Polietilen (masa jenis rendah)	$4{,}6\times10^{17}$
Polipropilen	$1{,}8\times10^{17}$
Polistiren	$1{,}8\times10^{17}$
PVC (diplastiskan oleh DOP)	$7{,}3\times10^{14}$
Politetrafluoroetilen*	$2{,}9\times10^{18}$
Polifluoroviniliden**	$2{,}3\times10^{14}$
Polikarbonat	$9{,}4\times10^{16}$
Karet alam	$1{,}7\times10^{14}$
Karet isobutilen-isopren	$1{,}9\times10^{16}$
Karet stiren-butadin	$2{,}8\times10^{15}$
Karet kloropren	$4{,}6\times10^{10}$
Karet nitril	$1{,}2\times10^{10}$
Karet fluoroelastomer	$1{,}4\times10^{12}$
Karet uretan	$1{,}6\times10^{10}$
Karet silikon	$2{,}0\times10^{15}$

* Diukur pada 360°C
** Diukur pada 170°C

PVC (64 kcal/mol). Pengaruh absorpsi kadar air adalah besar, karena hal tersebut mempercepat disosiasi ketakmurnian ion. Tabel 3.16 memperlihatkan ketahanan volume (Ω cm) berbagai bahan polimer. Sedangkan, ketahanan volume meningkat karena bertambah besarnya kristalinitas dan kesearahan molekul karena penarikan, menjadi rendah karena kefleksibelan yang besar dalam rantai molekul, dan tinggi karena bertambahnya jumlah ikatan silang.

1.4.3 Tahanan permukaan

Arus permukaan adalah arus listrik mengalir melalui air yang terkandung dan bahan lain yang bersifat hantaran yang melekat pada permukaan bahan polimer, dst., yang menerima pengaruh teradsorbsinya air di permukaan.

Ada hubungan antara:

$$\log\frac{i}{i_0}=\alpha\theta$$

dengan absorbsi air yang kecil, dan

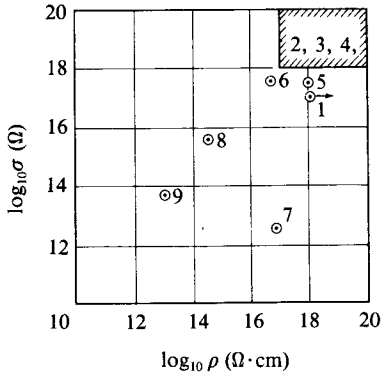
$$\frac{i}{i_0}=1+\beta\theta$$

dengan absorbsi air yang besar, di mana i adalah arus permukaan kalau lapisan adsorbsinya θ, i_0 adalah arus permukaan kalau $\theta=0$, dan α dan β adalah konstanta.

Polietilen dengan sifat higroskopiknya yang kecil, dispersi internal dari air merupakan variabel yang langsung pada absorbsi air dan pengeringan, dan seimbang dalam waktu yang singkat. Bahan lain menunjukkan reaksi yang agak terhambat. Gb. 3.16 menunjukkan hubungan antara ketahanan permukaan dan ketahanan volume pada 90% kelembaban relatip.

1.4.4 Konstanta dielektrik (Faktor kerugian dielektrik)

Kalau dua dielektrik ditempatkan dalam satu elektroda dan diberi tegangan DC,



1. Polipropilen
2. Polietilen
3. Polietilen (dengan karbon)
4. Polistilen
5. Polietilen tereftalat
6. Polimetil metakrilat
7. Polivinil klorid (kaku)
8. Polioksimetilen
9. Poliuretan (kaku)

Gb. 3.16 Hubungan antara tahanan permukaan (σ) dan tahanan volume (ρ) pada 90% RH.

maka muatan listrik disimpan di antara kutub, hal ini lebih besar terjadi dalam hampa udara. Perbandingan energi tersimpan dalam hampa udara per satuan volume dielektrik persatuan tegangan disebut konstanta dielektrik dalam bahan polimer. Yaitu kalau tegangan arus bolak balik V diberikan pada kondensor hampa udara, arus yang mengalir adalah:

$$I_0 = j\omega C_0 V$$

di mana j adalah suatu kompleks, ω frekuensi sudut arus bolak balik, C_0 kapasitas elektrostatik dalam kondensor hampa udara, dan

$$C_0 = \varepsilon_a \frac{A}{d}$$

di mana ε_a adalah suatu konstanta dielektrik dalam hampa udara, A adalah suatu luas dari elektroda dan d adalah jarak kutub.

Kalau hampa udara digantikan oleh dielektrik, umpamanya oleh bahan polimer, terjadi arus rugi sefasa dengan tegangan, maka arus total menjadi

$$I - (j\omega c + G)V$$

di mana c adalah kapasitas statik dari kondensor dielektrik, GV komponen arus rugi, dan G hantaran.

Arus total yang mengalir melalui kondensor dielektrik mempunyai sudut fasa $(90\text{-}\delta)°$, di mana $\delta°$ lebih kecil dari pada dalam hampa udara. Dengan arus rugi kecil, mendekati $\delta = 0$, yang dinyatakan dengan:

$$\tan\delta = \frac{\text{komponen arus rugi}}{\text{komponen arus pengisi}} = \frac{G}{\omega c}$$

di mana tan δ disebut tangen rugi dielektrik.

$$\text{Konstanta dielektrik AC adalah } \varepsilon' = \frac{c}{C_0}$$

Kerugian daya listrik (W) oleh kerugian dielektrik adalah:

$$W = GV^2 = \omega C_0 \varepsilon' \tan\delta V^2 = \omega \varepsilon_a \varepsilon' \tan\delta B.E^2$$

di mana B adalah volume dielektrik, E kuat medan listrik AC, $\varepsilon' \tan\delta = \varepsilon''$ adalah

medan listrik AC dari satuan kekuatan, yaitu kerugian daya yang dipakai untuk volume satuan dielektrik dalam satu siklus. Ini dinamakan kerugian dielektrik.

$$\dot{\varepsilon}=\varepsilon' - j\varepsilon''$$

$\dot{\varepsilon}$ disebut konstanta dielektrik kompleks.

Dari persamaan di atas kerugian dielektrik berbanding lurus dengan pangkat dua dari frekwensi dan tegangan, oleh karena itu untuk mengisolasi frekwensi dan tegangan yang tinggi lebih cocok memakai bahan yang mempunyai konstanta dielektrik kecil.

Bertentangan dengan itu untuk kondensor listrik lebih cocok memakai bahan yang mempunyai konstanta dielektrik besar dan tan δ kecil. Pada pemanasan dielektrik, panas dari kerugian dielektrik sebaliknya malah digunakan. Sebagai contoh, panas dielektrik pada mesin jahit, pemasak elektronik, memanaskan bahan dari dalam. Mengubah frekuensi pada konstanta dielektrik dan faktor kerugian dielektrik dari bahan polimer merupakan hal yang sukar, tapi umumnya pada frekuensi yang sangat rendah konstanta dielektrik ε' mempunyai harga tertentu dari ε_θ, yang menjadi berkurang kalau frekuensi naik, jadi pada daerah frekuensi yang tinggi menghasilkan harga tertentu yang rendah. Faktor kerugian dielektrik ε'' menjadi maksimum pada satu frekuensi (absorpsi dielektrik), dan menurun setelah itu. Perubahan ε'' pada satu frekuensi sekitar f_m maksimum adalah paling besar, dan berhubungan dengan struktur molekul seperti orientasi kelompok polar dan struktur halus yaitu orientasi, kristalinitas dst.

Tabel 3.17 Sifat listrik isolator polimer utama.

Polimer	Kekuatan hancur dielektrik (kV/mm)	Ketahanan volume (Ω cm)	Kapasitas induksi spesifik		tan δ (10^{-4})	
			50 Hz	1 MHz	50 Hz	1 MHz
PVC kaku	17–50	10^{16}	3,2–3,6	2,3–3,1	70–200	90–100
PVC fleksibel	10–30	10^{11}–10^{14}	5,0–9,0	3,3–4,5	800–1500	400–1400
Polistiren	20–30	10^{17}	2,5–2,7	2,5–2,7	1–3	1–4
Polietilen	18–21	$>10^{16}$	2,2–2,4	2,2–2,4	<5	<5
Polipropilen	20–32	$>10^{16}$	—	2,0	—	3–10
Nilon	15–20	10^{12}–10^{15}	5,0–14,0	4,0–4,7	600–1000	400–1300
Polietilen tereftalat	—	10^{16}–10^{17}	3,1–3,2	2,9–3,0	10–20	160–180
Polikarbonat	15–20	10^{16}–10^{17}	3,0	2,9–3,0	15–20	90–100
Resin poliamide (film)	(120)	$>10^{18}$	3,5	3,4	20	80
Oksida polifenilen (film)	(20–120)	$>10^{18}$	2,6	2,6	10	60
Poliviniliden fluorid	10–15	2×10^{14}	8,4	6,4	500	1600
Politetrafluoroetilen	20	10^{18}	2,0	2,0	2,0	<2
Resin fenol (dasar kertas)	15–40	10^{10}–10^{12}	5,0–7,0	4,6–5,5	400–1500	350–450
Resin melamin (dasar gelas)	10–20	10^{11}–10^{12}	9,7–11,0	6,6–7,5	1400–2300	130–150
Resin poliester (dasar gelas)	10–30	10^{12}–10^{14}	4,5–6,0	4,2–5,0	250–800	150–400
Resin epoksi (dasar gelas)	15–30	10^{12}–10^{15}	4,8–8,0	4,5–5,2	150–1000	150–400
Resin silikon (dasar gelas)	10–20	10^{14}–10^{16}	3,5–4,5	3,5–4,2	60–200	30–80
Karet alam	20–30	10^{15}–10^{17}	(1 kHz) 2,7–3,0	—	(1 kHz) 23–30	—
Karet butil	20–30	10^{15}–10^{17}	(1 kHz) 2,1–2,4	—	(1 kHz) 30	—
Kloropren	10–15	10^{12}–10^{13}	6,0–9,0	—	200–500	—
Karet silikon	5–25	10^{14}–10^{15}	(1 kHz) 3,0–3,5	—	10–100	—
Fluoroelastomer	10–25	10^{13}–10^{14}	6,0–2,0	—	120–500	—

Umumnya faktor kerugian ε'' meningkat karena absorpsi air. Kalau bahan polimer terdegradasi oleh oksigen, sinar UV dst, berbagai kelompok polar seperti C=O, COOH, dst, menjadi rusak, dan akibatnya ε'' meningkat atau absorpsi dielektrik tidak pernah rusak sebelum terjadi degradasi. Tabel 3.17 memperlihatkan sifat-sifat listrik dari bahan polimer.

1.4.5 Elektrifikasi

Bahan polimer diberi listrik oleh pemisahan, gesekan, dan pengelupasan dari berbagai bahan lain. Elektrifikasi disebabkan oleh lapisan ganda listrik yang terjadi pada antar muka bahan, jadi kalau dipisahkan, muatan listrik tetap dijaga oleh keduanya. Sebagaimana telah dikemukakan terdahulu bahan polimer merupakan isolator listrik yang baik dan dalam banyak hal sifat higroskopinya kurang baik, jadi kalau diberi listrik, muatan listrik sukar dikurangi. Karena itu sering terjadi gangguan seperti penyalaan atau ledakan oleh loncatan listrik statik tiba-tiba, absorpsi kejutan listrik pada badan, perusakan pada kualitas produk, dan seterusnya, pencegahannya diusahakan dengan menghilangkannya melalui tanah, pengontrolan kelembaban (menjaga kelembaban tetap tinggi) atau mencampurkan bahan anti statik kepada polimer. Sebagai perlakuan anti statik adalah mencampurkan bahan lain kepada polimer yaitu bahan karbon yang mempunyai hantaran listrik baik atau beberapa jenis polimer yang mempunyai sifat serupa, atau dengan jalan melapisi permukaannya oleh bahan yang bersifat higroskopi dan menghantar listrik.

1.5 Sifat-sifat kimia

Pertama akan dijelaskan mengenai kelarutan dan tahanan kimia dari bahan termoplastik.

1.5.1 Kelarutan

Bahan bermolekul besar menunjukkan kelaluan yang rumit dalam hal melarut dibanding dengan bahan bermolekul kecil. Kalau bahan polimer dijenuhkan oleh bahan pelarut yang baik, maka pada umumnya polimer tersebut akan membengkak, didispersikan dan dilarutkan. Salah satu kriteria kelarutan adalah parameter kelarutan:

$$\delta=(\Delta E/V)^{1/2}$$

di mana ΔE adalah energi penguapan dari komponen, V kapasitas molar (cc) dan $\Delta E/V$ kerapatan energi. Ada hubungan:

$$B(\delta_1-\delta_2)^2$$

di mana B adalah kerapatan energi mutual, δ_1 dan δ_2 masing-masing parameter kelarutan dari pelarut dan polimer. Di samping itu ada hubungan termodinamika dalam hal melarut berdasarkan teori Flory-Huggins yaitu:

$$\Delta F_1=RT\left\{(\chi-1/2)\phi_2^2-\frac{\phi_2}{m}\ldots\right\}$$

di mana ΔF_1 adalah energi bebas polimer amorf dan pelarut dalam campuran. R konstanta gas, ϕ_2 fraksi volume polimer dalam larutan, m volume jenis polimer dan

pelarut, T temperatur absolut dan χ adalah parameter mutual dari Flory.

Dalam persamaan dini harusnya $\Delta F_1 \leqq 0$ untuk melarut yang stabil, jadi sampai $\chi = 0{,}5$ suatu larutan adalah stabil, dan merupakan pelarut baik kalau mempunyai χ lebih kecil. Harga m berbanding lurus dengan panjang rantai molekul (berat molekul) bahan polimer, dan polimer dapat larut kalau m kecil, meskipun χ besar. Berat molekul yang besar berarti sukar larut.

Umumnya dalam pembahasan kelarutan polimer dipergunakan kerapatan energi mutual B dan parameter mutual χ dari Flory. B adalah indeks ketakcampuran dan ketaklarutan yang makin kecil makin baik. Bahan lebih mudah larut kalau kedua parameter kelarutan dari polimer (δ_2) dan dari pelarut (δ_1) adalah sama. Tapi hal ini tidak selalu dapat dipakai kalau ada terjadi antar aksi khusus seperti kepolaran, asosiasi, solvasi, ikatan hidrogen, dst, karena persamaan di atas dianggap tidak terpengaruh secara tepat. Hubungan tersebut seharusnya terbatas pada kasus pelarut non-polar dan polimer amorf non-polar, walaupun demikian dapat dipakai untuk lainnya.

Ada beberapa faktor yang menentukan kelarutan yaitu:

1) Temperatur larutan: Umumnya kalau temperatur naik kelarutan meningkat.
2) Berat molekul, struktur molekul: Seperti telah dikemukakan di atas kalau berat molekul besar kelarutan kecil. Polimer dengan struktur ikatan silang dapat membengkak tetapi tidak larut seluruhnya. Dalam hubungan dengan fleksibilitas dari polimer rantai, molekul kaku seperti pada selulosa dan polioksimetilen, agak susah untuk larut. Polimer bercabang mudah larut dibandingkan dengan polimer lurus.
3) Kristalinitas: Menyangkut derajat kristalinitas. Bahan yang memiliki kristalinitas tinggi seperti polietilen dan polipropilen mempunyai kelarutan yang kurang, tetapi polimer berkristal yang biasa bisa larut.
4) Kepolaran: Bahan polimer mudah sekali larut dalam pelarut polar. Berbagai kelompok dengan kepolaran-kepolaran yang berbeda dalam molekulnya, akan mudah larut dalam campuran pelarut yang bersangkutan. Umumnya kalau struktur bahan terlarut serupa dengan pelarut, mereka saling melarut.
5) Pelarut campuran: Kalau ke dalam suatu pelarut di mana polimer bisa larut dibubuhkan pelarut lain, kadang-kadang kelarutannya meningkat. Ada kasus ekstrem di mana polimer bisa larut dalam campuran pelarut yang buruk.

Hubungan-hubungan ini dapat dijelaskan oleh berkurangnya harga χ dalam campuran pelarut atau harga δ yang dekat pada harga yang dimiliki polimer, tetapi penjelasan ini tidak cukup. Tabel 3.18 menunjukkan perameter kelarutan (δ) dari berbagai polimer. Tabel 3.19 menunjukkan harga (δ) dengan beberapa pelarut, dan Tabel 3.20 menunjukkan harga (χ) dalam pelarut polimer, sedangkan Tabel 3.21 menunjukkan kelarutan bahan polimer dalam berbagai pelarut.

1.5.2 Tahanan kimia

Ketahanan kimia berada di daerah luas mulai dari bahan yang sukar diserang oleh setiap bahan kimia seperti politetrafluoroetilen sampai ke bahan mudah larut dalam pelarut organik seperti dalam asetat dan alkohol, umpamanya polivinil asetat. Di sini terutama dibahas mengenai ketahanan terhadap asam dan alkali.

Sifat-sifat ini sampai sejauh tertentu dapat dianggap ditentukan oleh struktur molekul bahan polimer.

Polimer yang mempunyai kelompok eter, ester dan amida mudah terhidrolisa oleh asam. Selulosa, poliester, poliamid dan polimetil akrilat mempunyai

Tabel 3.18 Parameter kelarutan bukan polimer: δ(cal/cc)$^{1/2}$

Politetrafluoroetilen (teflon)	6,2
Polidimetilsiloksane (silikon)	7,3
Polietilen	7,9
Polibutadien	8,1
Polistiren	8,6
Polimetil methakrilat	9,1-9,5
Polivinil asetat	9,4
Polivinil klorida	9,5-9,7
Etil selulosa	10,3
Polietilen tereftalat	10,7
Poliviniliden klorida	12,2
Nylon 66	13,6
Policrilonitrile	15,4
Polivinil alkohol	23,4

Tabel 3.19 Parameter kelarutan dan pelarut non-polar: δ(cal/cc)$^{1/2}$

Hidrokarbon parafin	
Pentan	7,0
2-Metil butan (isopropentan)	6,7
Heksan	7,2
Heptan	7,4
Oktan	7,6
Nonan	7,7
Dekan	7,7
Heksadekan	8,0
Hidrokarbon siklus	
Siklopentan	8,1
Sikloheksan	8,2
Metilsikloheksan	7,8
Hidrokarbon aromatik	
Bensen	9,2
Toluen	8,9
Etil bensen	8,8
o-ksilen	9,0
m-ksilen	8,8
p-ksilen	9,5
Tetralin	9,5
Karbon tetraklorida	8,6

Tabel 3.20 Harga χ empiris pelarut polar untuk polimer polar.

Polimer	Pelarut	Temperatur (°C)	χ
Polivinil klorida	Etilen klorida	53	0,46
		76	0,43
	Nitropropan	53	0,44
Polivinil acetat	Dioksan	25	0,41
	Aseton	〃	0,44
	Metil etil keton	〃	0,43
Polimetil metakrilat	Etil asetat	25	0,48
	n-propil asetat	〃	0,49
	n-butil asetat	〃	0,50
	n-amil asetat	〃	0,51
	Aseton	〃	0,48
	Metil etil keton	〃	0,47
	Metil isobutil keton	〃	0,50
	Metil amil keton	〃	0,49
	Diisopropil keton	〃	0,50
	Heksametil keton	〃	0,52

kecenderungan tersebut. Apabila polietilen bersentuhan dengan asam belerang pekat atau asam nitrat, akan diserang dan terurai menerima akibat dari sulfonasi, nitrasi dan oksidasi pada cincin bensin. Resin urea, resin melamin dan resin epoksi menjadi lemah di dalam asam kuat. Terutama resin fenol dan resin metil metakrilat menerima akibat pengoksidasian asam, sedangkan resin fenol, resin urea, resin melamin dan banyak resin kondensasi formalin lain sangat dipengaruhi oleh alkali kuat. Sifat kimia

Tabel 3.21 Kelarutan plastik.

Pelarut / Plastik	Polivinil asetat	Polivinil-klorida	Polivinil-iliden klorida	Polimetil metakrilat	Polistiren	Polietilen	Nilon
95% Etanol	L	TL	TL	TL	TL	TL	TL-SL
n-Butanol	L	TL	TL	TL	TL	TL	TL
Isopropil alkohol	L	TL	TL	TL	TL	TL	TL-SL
Etilen glikol	TL	TL	TL	TL	TL	TL	TL
Metil asetat	L	TL-2L	TL	SL	SL-L	TL	TL
Etil asetat 12% etanol	L	TL	TL	SL	SL-L	TL	TL
Butil asetat	L	SL-L	TL	SL-L	L	TL	TL-SL
Asam asetat	L	TL	TL	SL	TL-SL	SL	TL
m-Kresol	L	SL-L	TL	SL-L	TL-SL	SL	L
Eter	TL	TL	TL	SL-L	TL-SL	TL	TL
Dioksan	L	SL-L	SL	TL	L	TL	TL
Kolosolf	L	TL	TL	TL	TL-SL	TL	TL
Aseton	L	SL	TL	L	TL-SL	TL	TL
Sikloheksan	L	L	SL	SL	SL-S	TL	TL
Eter petroleum	TL	TL	TL	TL	TL-SL	(L)	TL
Toluen	L	TL-SL	TL	SL-L	L	(L)	TL
Nitroetan	L	L	TL	SL-L	TL-SL	TL	TL
Piridin	L	L	TL	SL-L	L	TL	TL
Morfolin	L	SL-L	SL	TL-SL	SL-L	TL	TL
Kloroform	L	TL-SL	TL	L	SL-L	SL	TL
Etilin diklorida	L	SL-L	TL	L	L	TL	TL
Trikoroetilin	L	SL-L	TL	SL-L	L	(L)	TL
Karbon disulfida	TL	TL-SL	TL	SL-L	L	TL	TL

TL: Tidak larut, L: Larut, SL: Sebagian larut, (L): Larut dengan pemanas

dari berbagai plastik dikemukakan pada Tabel 3.22.

1.6 Kemampuan nyala, tahanan nyala

Bahan polimer termasuk yang sangat mudah menyala seperti seluloid dan yang dapat habis terbakar sendiri secara spontan walaupun api dipadamkan setelah penyalaan, seperti pada polikarbonat. Penilaian sifat mampu nyala bahan polimer agak rumit, tetapi walaupun begitu di bawah ini beberapa hal tersebut dijelaskan:

(1) Dengan membakar bahan yang diletakkan mendatar

Cara ini ditetapkan dalam JIS-K6911-1970 dan ASTM-D635-1974. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 3.17, nyala api dari alat pembakar Bunsen dipegang pada sudut 30°, menyalakan ujung spesimen yang diletakkan mendatar untuk waktu selama 30 detik, dan api dijauhkan. Waktu yang diperlukan agar spesimen menyala disebut waktu penyalaan (detik) dan panjang spesimen yang terbakar disebut jarak bakar. Harga tersebut dipakai untuk menyatakan kemampuan nyala dari bahan.

1) Mampu nyala: Terbakar lebih lama dari 180 detik dengan nyala.
2) Habis terbakar sendiri: Jarak bakar lebih dari 25 mm tapi kurang dari 100 mm.
3) Tak mampu nyala: Jarak bakar kurang dari 25 mm.

Dalam ASTM, laju bakar menyatakan jarak bakar persatuan waktu, yang dipakai sebagai ukuran kemampuan nyala.

Kemampuan nyala, ditentukan secara masing-masing seperti untuk plastik fleksibel dalam ASTM-D568-1974, plastik kaku dalam ASTM-D7511-1974, plastik

Tabel 3.22 Sifat-sifat kimia plastik.

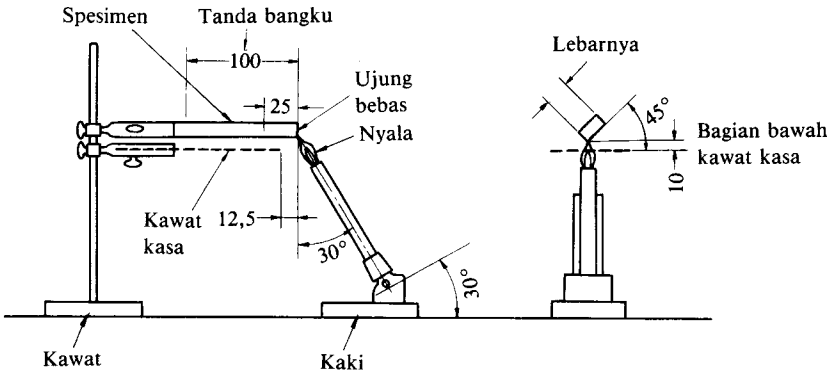
Sifat-sifat / Plastik	Laju nyala	Pengaruh sinar matahari	Pengaruh asam lemah	Pengaruh asam kuat	Dengan alkali lemah	Dengan alkali kuat	Dengan larutan organik	Tembus cahaya	Noda
Resin fenol: dengan pengisi	Sangat lambat	Umumnya jadi hitam	Tidak atau sedikit	Terurai dalam asam pengoksid tidak atau sedikit dalam asam pereduksi & organik	Sedikit atau sangat	Terurai	Sebagian larut	Tembus cahaya kabur	Bebas terbatas
Diisi bubuk kayu atau pulp kapas	〃	〃	〃		〃	〃	〃	Kedap cahaya.	
Diisi kain, benang	〃	〃	〃		〃	〃	〃	〃	〃
Resin urea diisi α-selulosa	—	—	〃	Terurai atau rusak pada permukaan	〃	〃	Tidak atau sedikit	Tembus cahaya-Kedap cahaya	Bebas
Resin melamin diisi α-selulosa	〃	Sedikit kehilangan warna	—	Terurai	—	Rusak	—	〃	〃
Resin epoksi dengan pengisi	Lambat	—	〃	Rusak	—	Tidak atau sedikit	Umumnya tidak larut	Tembus cahaya-kabur	〃
Resin silikon diisi serat gelas	—	Sedikit jadi hitam	Tidak atau sedikit	Sedikit	Tidak sedikit	Terurai	Sebagian larut dalam beberapa larutan nonpolar	Kedap cahaya	—
Poliester tidak jenuh: Dicor	Lambat (Terbakar sendiri) (T.S)	Tidak atau sedikit	〃	Agak rusak	〃	Rusak	Larut dalam keton & dan larutan terklorinasi.	Tembus cahaya	〃
Dilaminasi kain gelas			〃	〃	Sedikit	〃	Umumnya tidak.	Kedap cahaya	〃
Polivinil klorida: Kaku	—(T.S)	Sedikit hitam dalam waktu lama	〃	—	〃	—	Larut dalam keton dan ester	Tembus cahaya-kedap cahaya.	〃
Fleksibel	Lambat (T.S)		〃	〃	Tidak atau sedikit	〃	〃	〃	
Polivinilidin klorida	(T.S)	Sedikit	〃	—	〃	〃	—	Tembus-kedap cahaya	〃
Polimetil metakrilate	Lambat	Sangat sedikit	〃	Rusak karena asam pengoksid	〃	〃	Larut dalam keton, ester, aromatik hidrokarbon	Tembus cahaya (90–92%)	〃
Polistiren	〃	Sedikit kuning	〃	〃	〃	〃	Larut dalam ester, eter aromatik hidrokarbon	Tembus cahaya (88–92%)	〃
Polietilen	〃	Sedikit	〃	Tidak kec. HNO_3 kons.	〃	〃	Tidak di bawah 50°C	Tembus-kedap cahaya	〃
Poliamid	—(T.S)	Sedikit	Tidak kec. (pH < 5)	Rusak	〃	〃	Tidak larut dalam larutan umum	Tembus-kedap cahaya	〃
Politetra-fluoroetilen	—	—	—	—	〃	〃	Tidak	Kedap cahaya	—
Polipropilen	Lambat	Sedikit	〃	Sedikit	〃	〃	Membengkak dalam bensin	Kedap cahaya	Terbatas
Resin asetal	28 cm/men.	Sedikit oleh UV	Sedikit	Agak rusak	〃	Sedikit	—	Kedap cahaya	〃
Polikarbonat	(T.S)	—	—	Sedikit	〃	Sebagian rusak	Sebagian larut atau membengkak.	Tembus cahaya	〃

fleksibel tipis dalam ASTM-D143-1974 dan untuk busa plastik dalam ASTM-D1692-1974 dan ASTM-B014-1974. Untuk kemampuan penyalaan dipakai ASTM-D929-1968.

(2) Oleh indeks oksigen

JIS-K7201-1972 dan ASTM-D2863-1974 menentukan kemampuan nyala dengan indek oksigen (O.I.), yaitu konsentrasi oksigen minimum di dalam campuran oksigen dan nitrogen dalam persen volume yang dibutuhkan untuk membakar bahan.

$$\text{O.I.} = \frac{(O_2)}{(O_2)+(N_2)} \times 100(\%)$$



Gb. 3.17 Alat pengujian ketahanan panas.

di mana, O_2 adalah laju aliran oksigen (*l*/menit) yang diperlukan untuk menjamin terbakarnya spesimen selama 3 menit atau lebih, atau jarak bakarnya lebih dari 50 mm setelah penyalaan, dan N_2 adalah laju aliran nitrogen (*l*/menit) dalam keadaan sama.

(3) Oleh kepekatan asap

Kepekatan asap adalah penting dalam hal terjadi kebakaran. ASTM-D2843-1970 menetapkannya dengan jalan mempergunakan sumber cahaya dalam sebuah ruang yang mempunyai volume tertentu, yang intensitas penyinarannya tereduksi oleh pembakaran.

(4) Oleh standar UL

Standar "Underwriter's Laboratories Inc., USA menyatakan bahwa kemampuan nyala dibedakan menjadi: dapat menyala lambat (SB), dapat menyala sendiri (SE-1, SE-2), dan tak dapat nyala (SE-0). Standar ini penting bagi bahan polimer apabila dipergunakan untuk keperluan listrik (UL 92, UL 492 dan UL 746).

1.7 Ketahanan lama

Bahan polimer mempunyai banyak ketidak pastian kecuali bahan polimer alam, karena bahan polimer baru dikembangkan akhir-akhir ini. Ketahanan terhadap cuaca adalah hal utama yang akan dibahas. Ketahanan cuaca menyatakan tahanan terhadap terjadinya degradasi pada berbagai sifat apabila bahan dibiarkan di luar kena sinar matahari, hujan, angin, dst.

Kekuatan mekanik, kilap, warna, ukuran, berat, retakan, dst, adalah sifat-sifat yang dipengaruhi oleh sinar UV, temperatur, kelembaban, gaya luar, oksigen, ozon, SO_2, NO_2 dan lainnya yang terdapat di luar. Yang paling berpengaruh adalah sinar UV. Hal ini ditentukan masing-masing dalam JIS-A1410-1968, JIS-K7101-1969 dan ASTM-D1435-1969.

Dalam pengujian ini memerlukan waktu lama untuk mendapatkan hasilnya, tetapi sifat di atas merupakan sifat penting, oleh karena itu dalam laboratorium pengujian dipercepat dengan mempergunakan "fadeometer" yang dapat memberikan cahaya, temperatur dan kelembaban demikian juga "weather-o-meter" yang dapat memberikan cahaya, panas dan hujan sebagai tambahan. Cara pengujian ditentukan dalam JIS-K7102-1970, ASTM-D759-1956 T, ASTM-D1499-1964, ASTM-D1501-1971, ASTM-Z566-1970 dst dengan mempergunakan sumber cahaya yang berbeda.

2 | POLIMER TERMOPLASTIK

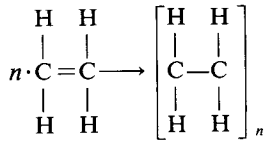
2.1 Resin untuk penggunaan umum

Resin yang dipakai sebagai bahan untuk memproduksi barang-barang yang diperlukan sehari-hari, berbagai barang kecil, kotak alat-alat listrik, film dan lembaran tipis pada umumnya, seharusnya mudah dicetak dan murah.

2.1.1 Polietilen

(1) Jenis dan cara produksi

Polietilen dibuat dengan jalan polimerisasi gas etilen, yang dapat diperoleh dengan memberi hidrogen gas petrolium pada pemecahan minyak (nafta), gas alam atau asetilen. Polimerisasi etilen ditunjukkan pada reaksi di bawah.



Yang digolongkan menjadi polietilen tekanan tinggi, tekanan medium dan tekanan rendah oleh tekanan pada polimerisasinya, atau masing-masing menjadi polietilen masa jenis rendah (LDPE) dengan masa jenis 0,910–0,926, polietilen masa jenis medium (MDPE) dengan masa jenis 0,926–0,940 dan polietilen masa jenis tinggi (HDPE) dengan masa jenis 0,941–0,965, menurut masa jenisnya, karena sifat-sifatnya erat hubungannya dengan masa jenisnya (kristalinitas). Termasuk polipropilen yang semua disebut poliolefin. Sebagai tambahan, semuanya adalah polietilen dengan berat molekul rendah (1.000–12.000), polietilen dengan berat molekul sangat tinggi (1–4 juta) demikian juga polietilen yang dikopolimerkan, polietilen yang diikat silangkan dan polietilen dibusakan.

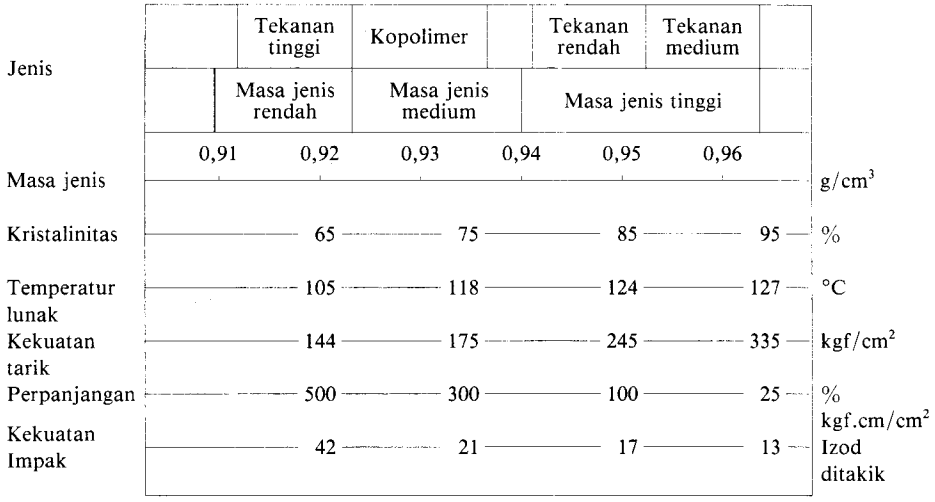
(2) Sifat-sifat

Secara kimia polietilen merupakan parafin yang mempunyai berat molekul tinggi. Karena itu sifat-sifatnya serupa dengan sifat-sifat parafin. Terbakar kalau dinyalakan dan menjadi cair, menjadi rata kalau dijatuhkan di atas air.

(a) Hubungan dengan masa jenis

Dengan cara polimerisasi etilen yang berbeda didapat struktur molekul yang berbeda pula. Pada polietilen masa jenis rendah, molekul-molekulnya tidak mengristal secara baik tetapi mempunyai banyak cabang. Di fihak lain polietilen tekanan rendah kurang bercabang dan merupakan rantai lurus, karena itu masa jenisnya lebih besar sebab mengristal secara baik sehingga mempunyai kristalinitas tinggi. Karena kristal yang terbentuk baik itu mempunyai gaya antar molekul kuat, maka bahan ini memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan titik lunak yang tinggi pula. Tabel 3.23 menunjukkan hubungan antara masa jenis dan sifat-sifat lain

Tabel 3.23 Sifat polietilen menurut masa jenis.



polietilen.

(b) Hubungan dengan berat molekul.

Sifatnya cukup berubah oleh perubahan masa jenis. Kalau masa jenis (kristalinitas) sama, sifat-sifat mekanik dan mampu olahnya berbeda menurut ukuran molekul. Karena berat molekul kecil, kecairannya pada waktu cair lebih baik, sedangkan ketahanan akan zat pelarut dan kekuatannya menurun. Umumnya indeks cair (MI) dipergunakan untuk menyatakan berat molekul. Polietilen pada temperatur tetap 190°C diekstrusi melalui lubang dengan diameter 2,1 mm dan panjang 8 mm, memberikan 2161 g selama 10 menit. Jumlah yang terekstruksikan dalam gram adalah indek cair. Tabel 3.24 menunjukkan hubungan antara titik cair dengan sifat-sifat lain.

Tabel 3.24 Perubahan sifat polietilen oleh masa jenis dan indeks cairan (MI).

Sifat-sifat	Masa jenis meningkat (0,915–0,965)	MI meningkat (berat molekul meningkat)
Viskositas cairan	Naik	Turun
Kekerasan permukaan (ketahanan abrasi)	diperbaiki	Sedikit berkurang
Film gerak	Diperbaiki	Tidak berubah
Temp. penahan panas terendah	Dinaikkan	berkurang
Kekuatan tarik (mulur)	Sangat diperbaiki	Sedikit berkurang
Perpanjangan	Lebih kecil	Lebih kecil
Ketahanan lelah	Diperbaiki	Sedikit berkurang
Kekakuan lentur	Sangat diperbaiki	Sedikit berkurang
Ketahanan impak film	Berkurang	Berkurang
Ketahanan tegangan retak	Berkurang*	Sangat berkurang
Tembus cahaya	Diperbaiki*	Diperbaiki
Kilatan permukaan	Diperbaiki**	Diperbaiki
Permeabilitas uap air	Berkurang	—
Permeabilitas gas cairan	Sangat berkurang	—
Laju susut cetakan	Diperbesar	Lebih kecil
Sifat listrik	Sedikit diperbaiki	Tidak berubah

* Berubah oleh keadaan pengujian
** Berubah oleh keadaan cetakan

(c) Sifat-sifat listrik

Polietilen merupakan polimer non polar yang khas memiliki sifat-sifat listrik yang baik. Terutama sangat baik dalam sifat khas frekwensi tinggi, banyak dipakai sebagai bahan isolasi untuk radar, TV dan berbagai alat komunikasi. Akan mempunyai sifat lebih baik lagi kalau masa jenisnya lebih tinggi.

(d) Sifat-sifat kimia

Polietilen adalah bahan polimer yang sifat-sifat kimianya cukup stabil tahan berbagai bahan kimia kecuali kalida dan oksida kuat. Ia larut dalam hidrokarbon aromatik dan larutan hidrokarbon yang terklorinasi di atas temperatur 70°C, tetapi tidak ada pelarut yang dapat melarutkan polietilen secara sempurna pada temperatur biasa. Karena bersifat non polar polietilen tidak mudah diolah dengan merekat dan mencap. Perlu perlakuan tambahan tertentu seperti oksidasi pada permukaan atau pengubahan struktur permukaannya oleh sinar elektron yang kuat. Kalau dipanaskan tanpa berhubungan dengan oksigen, hanya mencair sampai 300°C, kemudian terurai karena termal kalau melampaui temperatur tersebut. Tetapi kalau dipanaskan dengan disertai adanya oksigen akan teroksidasi walaupun baru 50°C. Karena polietilen lemah terhadap sinar UV, bahan anti oksida seperti turunan naftilamin, atau bahan pengabsorb UV seperti serbuk karbon, bensofenon, ester asam salisil, dicampurkan untuk memperbaiki ketahanan VU, perlu menjadi perhatian karena polietilen akan retak di bawah pengaruh tegangan apabila berhubungan dengan berbagai surfaktan, minyak mineral, alkali, alkohol dsb.

(e) Permeabilitas gas

Film polietilen sangat sukar ditembus air, tetapi mempunyai permeabilitas cukup tinggi terhadap CO_2, pelarut organik, parfum, dsb. Polietilen masa jenis tinggi kurang permeabel daripada polietilen dengan masa jenis rendah.

(3) Polietilen keperluan khusus

(a) Polietilen berberat molekul rendah (1.000–12.000)

Dapat diperoleh berbagai mutu mulai dari pelumas pada temperatur sampai bahan dengan titik cair 100°C tergantung pada masa jenis dan berat molekulnya. Dipergunakan untuk memperbaiki mampu cetak dengan mencampur atau dipakai untuk membuat kertas tahan air, kain tanpa tenunan, pelapis, dan seterusnya, dengan jalan pelapisan. Dipakai juga untuk membebaskan cetakan, pemolisan, dsb.

(b) Polietilen berberat molekul sangat tinggi (1–4 juta)

Bahan ini sukar untuk diolah karena kecairannya yang buruk, walaupun agak lunak dengan meningkatkannya temperatur. Tetapi ia mempunyai ketahanan impak yang baik, ketahanan abrasi sangat baik, mempunyai sifat mekanik yang baik dan pemelaran yang kecil pada temperatur sekitar 100°C.

(c) Polietilen berikatan silang

Kalau secara antar molekul diikat silangkan oleh penyinaran sinar radioaktif energi tinggi seperti dengan sinar elektor, sinar beta, sinar gama, dan seterusnya, kekuatan tarik, ketahanan retak-tegangan menjadi lebih baik dan titik lunaknya meningkat (250°C).

(d) Polietilen busa

Kalau polietilen diikat-silangkan dan dibusakan, masa jenisnya bervariasi dari daerah yang cukup lebar. Maka bahan ini dapat dipergunakan untuk isolasi dan bahan akustik. Bahan busa rendah dipakai sebagai pengganti bahan kayu.

(4) Mampu olah

Polietilen mudah diolah, maka dari itu sering dicetak dengan penekanan, injeksi,

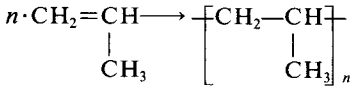
ekstrusi peniupan dan dengan hampa udara. Perlu diperhatikan bahwa penyusutannya tinggi.

(5) Penggunaan

Pada temperatur rendah bersifat fleksibel tahan impak dan tahan bahan kimia. Karena itu dipakai untuk berbagai keperluan termasuk untuk pembuatan berbagai wadah, alat dapur, berbagai barang kecil, botol-botol, tempat minyak tanah, film, pipa, isolator kabel listrik, serat, kantong tempat sampah dan sebagainya.

2.1.2 Polipropilen

Bahan baku polipropilen didapat dengan menguraikan petroleum (naftan) dengan cara yang sama seperti pada etilen. Menurut proses yang serupa dengan metoda tekanan rendah untuk polietilen, mempergunakan katalis Zieger-Natta, polipropilen dengan keteraturan ruang dapat diperoleh dari propilen.



Propilen Polipropilen

Polipropilen ataktik tanpa keteraturan ruang dan mempunyai titik lunak rendah dipisahkan oleh ekstraksi dengan pentan dan disisihkan.

(1) Sifat-sifat

Sifat-sifat polipropilen serupa dengan sifat-sifat polietilen. Masa jenisnya rendah (0,90–0,92). Termasuk kelompok yang paling ringan di antara bahan polimer. Dapat terbakar kalau dinyalakan. Dibandingkan dengan polietilen masa jenis tinggi titik lunaknya tinggi sekali (176°C, T_m), kekuatan tarik, kekuatan lentur dan kekakuannya lebih tinggi, tetapi ketahanan impaknya rendah terutama pada temperatur rendah. Sifat tembus cahayanya pada pencetakan lebih baik dari pada polietilen dengan permukaan yang mengkilap, penyusutannya pada pencetakan kecil, penampilan dan ketelitian dimensinya lebih baik. Sifat mekaniknya dapat ditingkatkan sampai batas tertentu dengan jalan mencampurkan serat gelas. Pemuaian termal juga dapat diperbaiki sampai setingkat dengan resin termoset. Sifat-sifat listriknya hampir sama dengan sifat-sifat pada polietilen. Ketahanan kimianya kira-kira sama bahkan lebih baik daripada polietilen masa jenis tinggi. Ketahanan retak-tegangannya sangat baik. Dalam hidrokarbon aromatik dan hidrokarbon yang terklorinasi, larut pada 80°C atau lebih, tetapi pada temperatur biasa hanya membengkak. Oleh karena itu sukar untuk diolah dengan perekatan dan pencapan seperti halnya dengan polietilen yang memerlukan perlakuan tertentu pada permukaannya.

Molekul polipropilen mengandung atom karbon tertier dengan gugus metil rantai utama. Atom hidrogen terikat pada atom karbon tertier yang mudah bereaksi dengan oksigen dan ozon, yang menyebabkan ketahanan oksidasinya lebih kecil daripada polietilen. Di lain fihak karena temperatur pengolahan lebih tinggi daripada polietilen, oksidasi harus dicegah. Fenol alkil dipakai sebagai anti oksidasi yang dikombinasikan dengan senyawa belerang organik atau senyawa amin.

Agar degradasi oleh sinar Ultra Violet secara efektif dapat dikurangi, maka dicampurkan bubuk karbon sebagai bahan pengabsorb UV. Polipropilen mempunyai tembus cahaya jauh lebih baik daripada polietilen, karena itu dipakai sebagai bahan pada pembuatan film. Dengan mempergunakan bahan penginti kristal, ukuran kristal dapat

dibuat lebih kecil agar lebih transparan, yang juga memperbaiki kekakuannya dan kekuatan impaknya pada temperatur rendah. Sebagai penginti dipergunakan bahan Na, Zn, Al dan garam-garam logam lainnya dari asam karboksilat aromatik. Permeabilitas gas polipropilen lebih baik daripada polietilen, karena itu perlu berhati-hati untuk mencegah dispersi pada pengepakan wangi-wangian tersebut.

(2) Mampu cetak

Polipropilen mempunyai sifat mampu cetak yang baik seperti halnya polietilen. Seperti telah diutarakan diatas polipropilen mempunyai faktor penyusutan cetakan yang lebih kecil dibandingkan dengan polietilen yang bermasa jenis tinggi, pada kondisi optimal dapat diperoleh produk dengan ketelitian dimensinya baik dan tegangan sisa yang kecil.

Tabel 3.25 adalah perbandingan beberapa sifat antara polietilen dan polipropilen.

Tabel 3.25 Perbandingan sifat antara polipropilen dan polietilen.

Sifat-sifat \ Resin	Polipropilen	Polietilen masa jenis tinggi	Polietilen masa jenis rendah
Ketelitian dimensi	○	×	×
Kekuatan	○	○	△
Ketahanan impak	○	◉	◉
Ketahanan melar	◉	○	×
Ketahanan panas	◉	○	×
Ketahanan cuaca	△	△	○
Ketahanan retak tegangan	◉	×	▽
Kekerasan	○	△	×
Berat jenis	◉	○	◉
Sifat tembus cahaya	△	×	×
Ketahanan dingin	○	◉	◉
Ketahanan permeabilitas gas	○	○	△

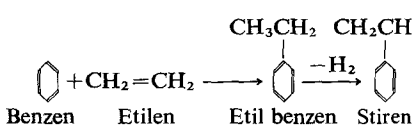
◉: Sempurna, ○: Baik sekali, △: Baik, ×: Tidak baik,

(3) Penggunaan

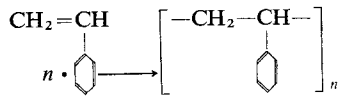
Hampir sama seperti polietilen, polipropilen banyak dipakai sebagai bahan dalam produksi peralatan meja makan, keranjang, peralatan kamar mandi, keperluan rumah tangga, mainan, peralatan listrik, barang-barang kecil, komponen mobil, dst. Penggunaan yang luas itu berkat mampu cetaknya yang baik, permukaannya yang licin mengkilat dan tembus cahaya. Film yang diregangkan pada dua arah sumbu adalah kuat dan baik ketahanan impaknya pada temperatur rendah. Untuk memperbaiki permeabilitas gas dan mampu sekat terhadap panas telah dikembangkan berbagai macam laminasi film.

Benang celah dibuat dengan jalan meregangkan film sampai putus pada panjang yang sama, dan benang pisah dengan robekan yang banyak, dipakai untuk membuat tali dan pita untuk keperluan pengepakan. Serat dipergunakan untuk tambang, karpet, tirai dan bahkan yang dicetak tiup untuk berbagai macam botol.

2.1.3 Polistiren



Monomer stiren dibuat dari benzen dan etilen dipolimerisasikan oleh panas, cahaya dan katalis.



(1) Sifat-sifat

Polistiren tidak berwarna dan merupakan resin transparan dapat diwarnai secara bening. Masa jenisnya lebih rendah dari polietilen dan polipropilen. Memiliki sifat listrik yang baik sekali terutama bagi frekwensi tinggi, walaupun kestabilan terhadap cahaya dan sifat tahan cuacanya agak rendah daripada resin metakrilik. Ketahanan radiasinya sangat baik. Polistiren mudah larut dalam keton ester dan pelarut hidrokarbon aromatik, tahan terhadap asam, alkali, asam klor, asam organik, minyak bumi dan alkohol. Kestabilan panas dan kecairannya pada pencairan sangat baik, sedangkan barang cetakan yang titik lunaknya rendah (70°C) memiliki ketahanan impak yang rendah dan bersifat getas. Ketahanan terhadap retak tegangan, juga kurang baik.

(2) Jenis

(a) Polistiren keperluan umum (GP)

Adalah plastik yang paling umum dipakai.

(b) Polistiren dengan ketahanan impak tinggi (HI)

Kegetasan, yang merupakan kekurangan bagi polistiren, telah diperbaiki terutama dengan jalan mencampurkan 5–20% karet sintetik atau SBR (Styrene Butadiene Rubber). Makin banyak kadar karetnya makin baik ketahanan impaknya sedangkan sebaliknya terjadi pada kekuatan tarik, ketahanan panas, mampu cetak, kehalusan permukaan dst makin berkurang. Untuk memperbaiki sifat tembus cahaya dari bahan yang dicampur karet, dibuat sehalus mungkin partikel karet yang didispersikan agar dapat menghindari hamburan cahaya, dengan itu pula kekuatan impaknya menjadi lebih baik.

(c) Polictiren tahan cahaya

Seperti telah diutarakan di atas, polistiren mempunyai ketahanan cahaya yang buruk, jadi karena cahaya fluoresen dan cahaya matahari langsung menjadi pudar warnanya dan terdegradasi. Polistiren keperluan umum tidak cocok untuk peralatan yang kena sinar atau penggunaan di luar rumah. Jenis ini telah dikembangkan dengan mencampur zat pengabsorp Ultra Violet dan zat antioksidasi.

(d) Polistiren busa

Butan, pentan, heksan dst, dicampurkan sebagai bahan pembusa bagi polistiren, yang dibuat dalam bentuk butiran. Kalau dipanaskan dalam cetakan akan mengembang menjadi 20–70 kali lebih besar menjadi lunak dan kuat sebagai barang busa yang tercetak. Kertas stiren yang mempunyai permukaan mengkilat bagus dibuat dengan mempergunakan mesin ekstrusi. Busa polistiren terdiri dari gelembung-gelembung kecil yan bebas sehingga dapat menghalangi panas atau suara.

(3) Pencetakan

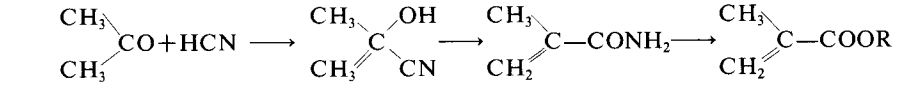
Polistiren akan lunak pada temperatur sekitar 95°C dan menjadi cairan kental pada 120–180°C dan menjadi encer di atas 250°C, kemudian terurai di atas 320–330°C. Karena itu, dibanding dengan resin termoplastik lain, bahan ini mempunyai temperatur dekomposisi termal yang lebih tinggi dan kecairannya lebih baik. Pencetakan injeksi adalah cara yang paling cocok. Akan tetapi karena tegangan dalam

terjadi selama pencetakan, maka perlu penganilan yang tepat. Yaitu dipanaskan pada temperatur lebih rendah dari temperatur ketahanan panasnya (70–80°C) kemudian didinginkan perlahan-lahan.

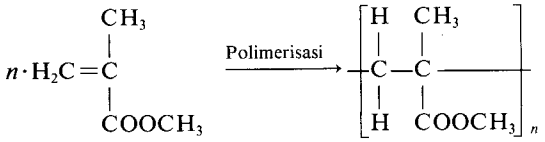
(4) Penggunaan

Polistiren keperluan umum dan yang mempunyai kekuatan impak tinggi, dipakai untuk radio TV, refrigerator dan peralatan listrik lainnya demikian juga untuk peti kemas dan barang rumah tangga. Polistiren busa dipakai sebagai bahan isolasi panas dan bahan pengepakan.

2.1.4 Polimetil metakrilat (Resin metakrilat)



Aseton — Asam sianida — Cianhidrin aseton — Metakrilat amida — Ester asam metakrilat



(1) Sifat-sifat

Seperti ditunjukkan pada Tabel 3.26 sifat tembus cahaya resin metakrilat sangat baik, terutama untuk daerah sinar tampak, menjadikan plastik ini paling baik. Masa jenisnya sekitar 1/2 dari gelas, kekuatan impaknya 10 kali berat dari pada gelas, dan juga ketahanan cuacanya sangat baik. Meskipun dipergunakan di luar dalam jangka waktu yang lama, turunnya kekuatan dan pudarnya warna sangat kurang. Pada pemotongan, pelubangan dst, gejala menjadi putih dan ketidak sempurnaan juga kurang. Di samping itu bahan ini mempunyai sifat isolasi listrik yang baik, terutama pada daerah frekuensi rendah. Ketahanan kimianya lebih baik daripada polistiren. Larut baik dalam klorida etilen dan kloroform.

Tabel 3.26 Penembusan cahaya tampak pada plastik.

Ketebalan 3 mm	Penembusan cahaya tampak (%)
Resin metakrilat	93
Polistiren	90
Resin poliester	65
Resin urea	65
Gelas biasa	91

(2) Mampu cetak

Polimer kental dikemukakan dalam pembuatan lembaran plastik. Proses yang kontinu sering dilakukan. Pencetakan ekstrusi juga dapat dilakukan, tetapi produknya sedikit kurang baik daripada produk yang dibuat dengan pengecoran dalam hal ketahanan panas, ketahanan melarut dan ketahanan impaknya. Pembentukan dari lembaran secara termal dilakukan dengan memanaskan lembaran tersebut sampai 140–160°C. Kalau dipanaskan berlebihan terjadi pembusaan dan kehilangan warna

sedangkan kalau dipanaskannya tidak cukup akan terjadi regangan dan retak.

(3) Penggunaan

Akhir-akhir ini banyak lembaran metakrilat yang dimodifikasikan telah dikembangkan untuk memperbaiki sifat-sifatnya. Bagi lembaran ini ada yang dimodifikasikan kekerasan permukaannya, ketahanan nyala, kekuatan impaknya dst. Polisterin dengan kekerasan permukaan yang dimodifikasikan, keras sekeras gelas dipergunakan sebagai lensa optik (kacamata), dsb. Dengan memanfaatkan sifat yang baik dalam ketahanan cuaca dan tembus cahayanya, maka dari bahan ini dibuat papan isyarat, peragaan, dst. Selanjutnya bahan ini sangat baik sebagai bahan konstruki dan barang untuk lampu penerangan, sering juga dipakai untuk kubah akrilat, lembaran bergelombang untuk penerangan, tegel dinding, perhiasan, pintu, plafon bercahaya, lampu gantung, tutup lampu. Bahan ini mudah dibentuk menjadi permukaan lengkung, dipakai untuk kaca pelindung pada pesawat terbang atau sepeda motor. Sebagai peralatan listrik dipakai untuk radio, kaca TV, panel meteran, serat optik, panel kapsul untuk spesimen serangga, peralatan makan, dan lainnya. Akan tetapi bahan ini mahal, lebih mahal daripada polistiren.

- Resin ester akrilat

$$CH{\equiv}CH + CO + ROH \longrightarrow CH_2{=}CH{\cdot}COOR$$

Asetilen Karbon monoksida Alkohol Asam akrilat ester

Tabel 3.27 dan tabel 3.28 menunjukkan penggunaan dan sifat-sifat berbagai ester akrilat.

Penggunaan:

1) Pengubah serat: Ini adalah penggunaan terbesar dari emulsi akrilat. Etil dan butil

Tabel 3.27 Penggunaan resin ester akrilik.

Penggunaan	Ester
Serat akrilik	Metil
Pengubah serat	Etil, butil
Cat resin akrilik	Etil, butil
Perekat	Etil, butil
Pemrosesan kertas	Etil, butil
Pemrosesan kulit	Etil, butil
Karet akrilik	Etil, butil

Tabel 3.28 Sifat-sifat ester akrilik.

	Ester metil	Ester etil	Ester butil
Berat molekul	86,09	100,1	128,17
Titik didih (°C)			
760 mm Hg	80,9	99,3	147
50 mm Hg	16,0	30	69
Berat jenis	0,9574	0,9230	0,9015
Indeks bias (n_D^{20})	1,4032	1,4060	1,4189
Viskositas (20°C, cp)	0,5	0,6	0,9
Kelarutan			
Ester/air	5,2	1,5	0,2
Air/ester	2,3	1,5	0,7
Tekanan uap (20°C mmHg)	68,2	29,5	40

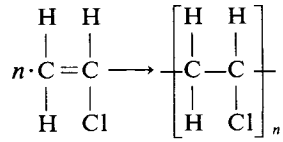
ester dipergunakan untuk perlakuan resin dari kain-kain yang tidak ditenun, pengikat pengecapan, dsb.

2) Cat: Ada ester akrilat, ester metakrilat, metakrilat tergabung, asam akrilat dikopolimerkan dan amida akrilat, dipakai dalam emulsi dan larutan. Lebih unggul sebagai cat dalam ketahanan cuaca dan ketahanan alkalinya.
3) Perekat: Kopolimer dari ester akrilat dan ester metakrilat, dan emulsi kopolimer dari butil akrilat dan vinil asetat dipakai sebagai perekat. Sebagai tambahan sangat luas penggunaannya untuk merekat kulit dan kertas.

2.1.5 Polivinil klorida

$$CH_2=CH_2 \xrightarrow{+Cl_2} CH_2Cl-CH_2Cl \xrightarrow{-HCl} CH_2=CHCl$$

Etilen — Etilen diklorida — Vinil klorida



Vinil klorida monomer — Polivinil klorida

(1) Sifat-sifat

Tepung putih dengan masa jenis 1,4 ini, baik dalam ketahanan air, ketahanan asam dan ketahanan alkali, tidak bersifat racum dan tidak menyala, isolasi listriknya baik dan tahan terhadap banyak larutan. Tabel 3.29 menunjukkan kelarutan PVC. Melunak pada 65–85°C dan plastis pada 120–150°C. Mencair pada atau di atas 170°C dan terurai memberikan asam klorida pada atau di atas 190°C. Temperatur yang cocok untuk pengolahan adalah 150–180°C, perlu diperhatikan. Akan tetapi sifat-sifat tersebut dapat berubah tergantung pada sistim produksi yang menyangkut keteraturan stereo dari polimer dan derajat polimerisasinya, oleh karena itu perlu dipilih bahan yang cocok untuk memenuhi keperluan. Derajat polimerisasi yang tinggi dari bahan memberikan sifat mekanik yang baik, tetapi temperatur proses tinggi dan sempit daerahnya. Kalau derajat polimerisasi rendah, maka sebaliknya sifat-sifat mekaniknya menjadi buruk, tetapi pemrosesannya mudah dan bersifat lebih rekat.

Bahan yang derajat polimerisasinya 2500–3000 dibuat untuk selang dan pembungkus, yang 1300–1700 dibuat untuk kabel listrik dan pasta, yang 1000–1300 dibuat untuk film, kulit imitasi, lembaran tipis dan pipa lunak, yang 700–800 dibuat untuk lembaran kaku, pipa kaku, botol, yang 400–500 dibuat untuk pelat gramopon, yang kurang dari 400 dipakai untuk cat dan perekat.

Karena bahan ini mempunyai kekuatan impak yang tidak begitu tinggi, maka bahan polimer lain seperti resin ABS, karet nitril, polietilen diklorkan, dsb, ditam-

Tabel 3.29 Kelarutan PVC (keadaan homopolimer).

Tidak larut dalam	Metanol, etanol, *n*-butanol, etilen glikol, asam asetat eter, air
Mengembang dalam	Gasolin, minyak pelumas, karbon disulfida, bensen, toluen
Sedikit larut dalam	Kloroform, trikloroetilen, aseton
Larut dalam	Sikloheksanon, nitrobensen, dioksan, butil asetat, dikloroetan, tetrahidrofuran, metilisobutil keton

bahkan 6–10 bagian, diaduk, dan dikopolimerkan agar sifatnya menjadi lebih baik. Karena bahan ini sangat buruk dalam kestabilan terhadap panas dan cahaya, maka dipakai bahan penyetabil tertentu, yaitu campuran dari timbal anorganik (oksida timbal, timbal sulfat tribasa), sabun logam dan senyawa tanah organik. Pengaruh dari penyetabil sangat tergantung pada bahan pemlastis yang dipakai.

(2) Mampu cetak

Cara pembuatan yang utama adalah pengkalenderan dan ekstrusi. Kedua bahan yang kaku dan lunak dapat dipergunakan. Pada pengekstrusian, bahan dipanaskan dalam 3–4 tahap dimulai dari 120–140°C sampai 140–160°C, 160–190°C, dan ditahan pada temperatur tertinggi tepat waktu mencapai cetakan.

(3) Penggunaan

Film vinil dipergunakan dalam pertanian, lapisan kabel listrik (sering dipakai karena ketahanan penuaan dan sebagai isolasi yang baik serta murah), produk dari resin pasta seperti boneka, mainan, sarung tangan tahan air, kulit berbusa dan lain-lain, dan pipa kaku. Lembaran tipis yang dibuat tanpa bahan pemlastis, lebih murah, lebih tahan lama dan dapat diwarnai, dipakai sangat banyak dan luas. Juga dipergunakan untuk botol, pencatat LP sangat baik dalam kestabilan dimensi dan tahan lama, serat tunggal atau yag dikopolimerkan dengan akrilonitril, klorida viniliden untuk jaring ikan, saringan dan tidak banyak dipakai sebagai serat umum.

2.1.6 Klorida polivinilidén

$$CH_2{=}CHCl \xrightarrow{Cl_2} CH_2Cl{-}CHCl_2 \xrightarrow{-HCl} CH_2{=}CCl_2$$

Vinil klorida — Trikloroetan — Viniliden klorida

$$n\cdot CH_2{=}CCl_2 \longrightarrow \left[\begin{array}{cc} H & Cl \\ | & | \\ C & -C \\ | & | \\ H & Cl \end{array}\right]_n$$

(1) Sifat-sifat

Monometer mempunyai titik lunak pada 185–200°C, dan temperatur penguraian pada 210–225°C. Sangat stabil terhadap bahan kimia, kurang permeabel terhadap gas dan uap, tidak dapat menyala dan sukar larut dalam larutan-larutan. Dengan mempergunakan sifat-sifat tersebut dan untuk memperbaiki sifat pemrosesan dan sifat-sifat lainnya sering dikopolimerkan dengan viniklorida dan akrilonitril. Akan tetapi sifat-sifatnya agak berubah tergantung pada perbandingannya.

(2) Penggunaan

(a) Kopolimer vinil klorida

Kopolimer ini biasa disebut "Saran", sebuah nama perdagangan dari Dow Chemical. Saran mempunyai temperatur pelunakan dari 185–200°C, tahan terhadap zat kimia dan ketahanan airnya baik. Sebagai serat dipergunakan untuk penutup tempat duduk di mobil, jaring ikan, kain saringan, kasa serangga, dst. Sebagai film, banyak dipakai untuk pengepakan karena sukar ditembus gas-gas.

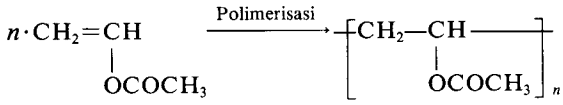
(b) Lateks

Lateks dipakai untuk cat, bahan tahan air, tahan lembab, dan bahan pemolis. Kopolimer dengan akrilonitril larut dalam metil etil keton (Dow F 120), aseton (F 220),

tetrahidrofuran (F 242), dan dipakai baik sekali untuk bahan pelapis. Bahan ini tahan zat kimia, ketahanan permeabilitas gasnya baik, dan dilarutkan dalam larutan yang cocok untuk pelapisan pada poliester, polietilen, selopan dst, untuk memperbaiki ketahanan akan kelembaban, ketahanan permeabilitas gas, ketahanan minyak dan permukaan yang mengkilap. Juga dipakai untuk pelapisan wadah yang terbuat dari logam dan kertas.

2.1.7 Polivinil asetat, polivinil alkohol dan polivinil asetal

Resin vinil asetat sendiri kekuatan mekaniknya rendah, ketahanan panasnya rendah, lebih mahal dari resin vinil klorida, dan ketahanan kimianya rendah. Jadi tidak dipakai untuk barang-barang yang dicetak dan serat-serat, tetapi dipakai untuk perekat dan sebagai bahan dasar permen karet. Bahan yang berasal dari polivinil alkohol, polivinil formal dan polivinil butiral adalah resin yang penting.



Vinil asetat Polivinil asetat

(1) Sifat-sifat

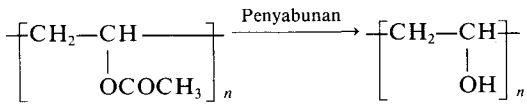
Polivinil asetat (PVAC) mempunyai gugus asetat yang besar dalam rantai samping, dan tidak pernah mengristal. Bahan ini getas pada atau di bawah T_g (280°C). Temperatur deformasi termal adalah rendah (38°C) dan tidak cocok untuk bahan cetakan. Dapat menahan asam lemah dan alkali lemah, tetapi rusak oleh asam dan basa kuat, larut dalam etanol, bensin, aseton dan banyak larutan bahan organik lainnya, dan tidak larut dalam air, etilen glikol, gliserin, sikloheksan, larutan napta dan minyak telepin. Polimer dapat bercampur dengan polimetil metakrilat, metil metakrilat, nitroselulosa, dan tidak bercampur dengan polistiren, selulosa asetat, polivinil klorida. Kalau monomer vinil asetat dikopolimerkan dengan etilen dan ester akrilat, titik transisi gelas (T_g) menjadi rendah bersifat elastomer. Gugus asetat pada rantai samping mudah disabunkan dan berubah menjadi polivinil alkohol (PVA) dengan berbagai jumlah penyabunan. Lateks dibuat dengan polimerisasi emulsi yang dibiarkan stabil dalam waktu yang lama kalau dilapisi permukaannya dengan PVA.

(2) Penggunaan

Sebagai perekat ada jenis emulsi dan jenis larutan, keduanya sangat banyak dipakai. Perekat tersebut terutama dipakai untuk kayu lapis, perekat kayu, kertas karton, pembuatan kantong, pengepakan dan untuk bahan busa. Sangat baik daya rekatnya, tahan cahaya, tahan abrasi, dan tidak begitu mahal. Dipergunakan untuk penggunaan dalam rumah. Untuk penggunaan di luar rumah, ester akrilat dikopolimerkan agar memperbaiki ketahanan terhadap air, alkali dan cuaca. Untuk pengolahan kertas, kekuatan dan ketahanan air diperbaiki dengan penganjian, atau ketahanan air dan mengkilapnya diperbaiki dengan pelapisan. Bahan dengan derajat polimerisasinya kira-kira 200–600 dipakai sebagai bahan dasar permen karet.

[Polivinil alkohol (PVA)]

Dibuat dengan penyabunan polivinil asetat



Tabel 3.30 Kelarutan PVA.

Saponifikasi (Penyabunan)	Air dingin	Air panas
95% atau di atas	Membengkak	Larut
80%	Larut	Tidak larut
50% atau di bawah*	Tidak larut	Tidak larut

* Larut dalam pelarut organik

(1) Siifat-sifat

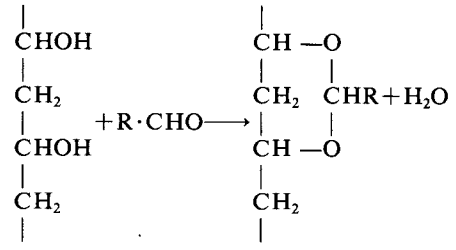
Ada bahan-bahan yang disabunkan lengkap atau sebagian. Tergantung pada derajat penyabunannya, sifat-sifatf PVA berubah sangat demikian juga kelarutannya dalam air (Tabel 3.30).

(2) Penggunaan

Bahan ini dipergunakan untuk membuat serat tiruan. Pada saat ini terutama dipakai untuk benang ban mobil, ban mesin, dan bahan industri lainnya. Mempunyai sifat elektrosatik yang rendah sehingga film dari bahan ini mengambil debu yang lebih sedikit. Bahan ini sering dipakai untuk pengepakan, bahan pewarna, bahan kimia, pupuk, yang dapat larut segera dalam air. Bahan ini dipakai sebagai pengubah sifat serat dan penganji benang untuk mencegah keriting dan patah atau untuk pengolahan kertas.

[Polimer asetal]

Bahan ini didapat dengan proses kondensasi (asetalasi) dari polivinil alkohol dan aldehida.



Polivinil alkohol Aldehid Polivinil asetal

(1) Sifat-sifat

Kalau formaldehid (formalasi) dan butil aldehid (butiralasasi) dipakai, polivi nil formal (PVC) dan polivinil butiral (PVB) masing-masing terbentuk. Keduanya dipakai untuk penggunaan praktis. Tabl 3.31 menunjukkan sifat-sifat PVC dan PVB.

Tabel 3.31 Sifat-sifat PVF dan PVB.

	PVF	PVB
Berat jenis	1,2–1,4	1,07–1,20
Kekuatan tarik (kgf/mm^2)	6,3–8,4	6
Perpanjangan (%)	7–11	15–60
Kekuatan impak (ditakik $kgf/cm/cm^2$)	2,2–4,2	3,2–3,5
Tahanan volum (Ω-cm)	10^{15}	$>10^{14}$
Kekuatan putus dielektrik (kV/mm)	12–14	16
Konstanta dielektrik (10^6 Hz)	3,0	3,3
Penyerapan air (24 j, 3 mm tebal, %)	0,8	1,0–3,0

Tentu saja sifat-sifatnya berubah tergantung pada derajat polimerisasi dari PVA, jenis bahan aldehid, derajat asetalasi dan jumlah kelompok sisa. PVB larut baik dalam alkohol, keton, ester dan larutan organik lainnya. Sebagai bahan pemlastis dapat dipakai ptalat dan glikol. Satu sifat khas dari PVB adalah dapat bercampur dengan resin lain, bercampur baik dengan resin fenol, resin melamin, resin urea, resin alkid dan selak.

(2) Penggunaan

PVC mempunyai isolasi listrik yang baik dan daya rekat yang baik dengan logam-logam, dipakai sebagai lapisan isolasi untuk kabel listrik setelah dicampur dengan alkilfenol (kabel yang diisolasi formal). Bahan ini memiliki sifat baik dalam tahanan terhadap panas, air, minyak, bahan kimia dan abrasi, dan sukar terdegradasi dengan meningkatnya temperatur. Selanjutnya bahan dapat dibuat berbentuk spons, jadi dapat dipakai untuk membuat bantal, kosmetik, saringan untuk makanan, dan sebagainya.

Sebagai lapisan antara pada kaca mobil, PVB, dengan kira-kira 65% butilasi dapat dipakai dengan mencampurkan bahan pemlastis dan bahan tambahan. Bahan ini mempunyai sifat tembus cahaya yang baik, sifat mekaniknya tidak terlalu dipengaruhi oleh temperatur; terutama ketahanan dinginnya baik, menjadi lunak pada temperatur $-50°C$. Juga tahan terhadap kelembaban, sedikit berubah warna oleh sinar matahari. Mempunyai sifat rekat yang baik dengan gelas, paling cocok dipakai untuk perekat kaca mobil dan kaca pesawat terbang demikian juga untuk kaca tahan peluru. Bahan ini juga merupakan perekat yang baik bagi setiap macam bahan. Kalau dipakai bersama dengan resin fenol, dapat diperoleh daya rekat yang kuat terhadap logam. Sebagai tambahan, dipakai sebagai cat karena daya lekatnya dengan logam memberikan pengaruh anti karat.

2.1.8 Resin kopolimer

(1) Resin EVA (Etilen-Vinil Asetat kopolimer)

Ini adalah kopolimer dari etilen (E) dan vinil asetat (VA). Sifat-sifatnya berubah tergantung pada kadar dan berat molekul dari VA. Kalau kadar VA kurang dari 7%, mendekati sifat polietilin dan kalau lebih dari itu titik pelunakan menurun jadi pada kadar VA yang sangat tinggi di atas 60%, menjadi cairan yang sangat kental. Umumnya bahan yang mengandung 7–60% VA biasa dipakai. Resin ini mudah dibengkokkan dan elastis seperti karet atau seperti PVC yang fleksibel. Bahan ini mudah dicetak, tahan cuaca dan tahan retak karena tegangan. Di samping itu tidak beracun dan bersih. Bahan yang berkadar VA lebih rendah dipakai untuk pengepakan (kemasan), laminasi dan bahan busa. Busa yang diikat silang bersifat elastis dan tahan abrasi. Bahan yang berkadar 25–30% VA dapat bercampur dengan parafin dan lilin, yang memperbaiki: daya lekat, kegetasan ketahanan lembab. Selanjutnya bahan dengan VA lebih banyak dipakai sebagai perekat jenis leleh panas untuk penjilidan buku juga untuk kayu lapis, pembuatan peti dan sepatu.

(2) Resin AS

Bahan ini adalah kopolimer dari akrilonitril dan polistiren dengan sifat mekanik yang lebih baik dan sifat tembus cahayanya tetap seperti bahan kedua. Bahan ini mempunyai kekuatan tarik dan elastisitas paling baik di antara resin termoplastik. Selanjutnya, ketahanan terhadap panas, cuaca minyak dan bahan kimia lebih baik. Sebaliknya kecairan dan mampu cetaknya agak jelek. Kalau kadar akrolonitril dinaikkan.

ketahanan terhadap minyak dan bahan kimia menjadi lebih baik tetapi mampu cetaknya sangat menurun. Biasanya dipakai bahan yang berkadar akrilonitril 20–30%.

(3) Resin ABS

Resin ini merupakan resin termoplastik dengan harga impak tinggi yang terdiri dari akrilonitril, butadien dan stiren, ini disebut resin ABS diambil dari singkatan tiga komponen, atau disebut terpolimer ABS. Tetapi bahan ini bukan kopolimer sederhana dari tiga komponen melainkan campuran polimer dengan dua fasa struktur yang tidak homogen, di mana polimer serupa karet terdispersikan secara halus dalam fasa AS yang kontinu. bahan ini dapat juga disebut resin AS diperkuat karet. Cara utama pembuatannya adalah sebagai berikut:

1) Pengadukan: Dalam metoda ini derajat ikatan silang dari karet yang dipakai berbanding dengan pencampurannya. Pada derajat ikatan silang yang lebih tinggi, dapat diperoleh kekuatan impak yang tinggi. Kadar karet 20–30% adalah baik. Dalam karet butadien dengan kadar setinggi 65%, tahanan impak pada temperatur rendah lebih bak.
2) Pencangkokan: Dalam hal ini proporsi dari kopolimer stiren akrilonitril yang dicangkokkan kepada karet (perbandingan cangkokan) adalah penting. Ketahanan impak diperbaiki kalau kadar karet ditambah sampai 30% sesuai dengan perbandingan cangkokan. Meskipun pada perbandingan yang sama, perbandingan cangkokan optimum berubah tergantung pada ukuran partikel dari karet. Pada pencangkokan kadar polibutadien umumnya 10–30%.
3) Pengadukan cangkok: Lateks ABS yang diperoleh dengan pencangkokan diaduk dengan lateks AS. Lateks karet yang dipakai mempunyai diameter partikel relatif kecil.

(a) Sifat-sifat

Sifat-sifat berubah-ubah karena metoda produksi, komponen resin, berat molekul, jenis dan komponen karet, ukuran partikel, derajat ikatan silang, perbandingan cangkokan, perbandingan resin dan karet, dst.

Dapat dikatakan bahwa resin mampu menghasilkan bahan secara bebas dengan karakteristik yang sesuai, yang dapat memenuhi daerah penggunaan yang luas. Tabel 3.32 menyatakan jenis resin ABS untuk penggunaan yang bersangkutan. Resin ABS adalah khas dengan ketahanan impak yang tinggi (khususnya sifat pada temperatur

Tabel 3.32 Jenis resin ABS.

Tahahan impak super
Tahanan impak tinggi
Tahanan impak medium
Kekakuan tinggi
Mampu alir tinggi
Untuk ekstrusi
Tahan panas
Tembus cahaya
Untuk pelapisan
Untuk pembusaan
Untuk pencampuran
Penguat serat gelas
Penahan api
Untuk pembentukan dingin
Untuk cetakan berputar

rendah) tanpa mengurangi kekuatan tarik dan kekakuan yang banyak, mampu mendapatkan bahan baik dengan suhu deformasi termal yang tinggi, maupun dengan sifat listrik yang unggul, ketahanan kimia, ketahanan minyak, kemampuan pemrosesan yang lebih baik, kestabilan dimensi, ketahanan melar dan ketahanan retak-tegangan, dan mempunyai kilap yang bagus. Bahan ini juga merupakan salah satu resin dengan kemampuan untuk dapat dilapisi dengan mudah. Bahan ini baik untuk digabungkan dengan resin lain, khususunya pencampuran dengan PVC sangat penting. Bila ABS dicampur dengan PVC pada 5–20% maka ketahanan impak akan bertambah sangat. Namum demikian akan timbul beberapa permasalahan dalam harga, daya tembus cahaya dan ketahanan cuaca. Dalam meningkatkan daya tembus cahaya, karet dibubukkan sampai sangat halus untuk mendekatkan indeks bias ke indeks bias resin. Untuk meningkatkan kemampuan terhadap cuaca, gunakanlah elastomer lain yang tak mengandung ikatan rangkap, karena diasumsikan bahwa penyebabnya adalah ikatan rangkap sisa dalam komponen butadien.

(b) Kemampuan cetak

Bahan ini sangat baik dibentuk, melebihi sifat-sifat stiren sebagai komponen utama, meskipun agak kurang dibandingkan dengan monomer stiren. Perlu dicatat bahwa pengeringan sebelum pencetakan diperlukan karena bersifat agak higroskopik.

(c) Penggunaan

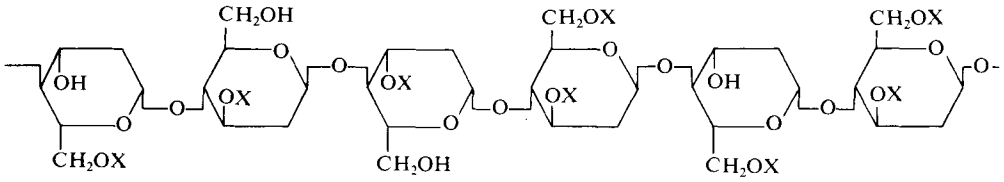
Bahan ini banyak digunakan dalam alat-alat listrik seperti peti es, mesin cuci, pembersih, radio, TV, dan lain-lain alat rumah tangga. Di samping itu, bahan ini juga digunakan secara luas sebagai serba-guna untuk komponen kereta api, komponen yang diam, mainan anak, alat rumah tnagga, jam, alat-alat optik, perabot, bahan konstruksi dan lain-lain.

2.1.9 Turunan selulosa

Selulosa mempunyai kelarutan jelek, dan jenis pelarut yang dapat digunakan terbatas. Namun demikian, dengan mengesterifikasi atau mengeterifikasi gugus hidroksil dari alkoholnya, bahan tersebut dapat dilebur dan dapat larut. Jadi, turunan selulosa yang dapat dibentuk digunakan untuk resin. Gb. 3.18 menunjukkan hubungan ini.

(1) Nitroselulosa (Seluloid)

Ini adalah resin yang telah lama dikenal dengan mencampurkan nitroselulosa, kamfer, alkohol dan zat pewarna, dan menghilangkan pelarut. Bila dipanaskan pada atau sekitar 180°C, maka akan mengurai mendadak dan menyala. Bahan ini kuat, daya serap airnya rendah, baik dalam ketelitian dimensi dan kemampuan pemrosesan secara mekanik, melunak pada suhu air panas dan mudah dicetak. Bahan ini mempunyai kekakuan yang baik, dan kekuatan impaknya tak begitu bergantung pada



Gb. 3.18 Rumus struktur dari plastik selulosa.

suhu. Namun demikian, yang kurang menguntungkan adalah bahwa bahan sangat mudah terbakar dan berbahaya dalam penggunaannya.

(2) Asetil selulosa

(a) Sifat-sifat

Ini adalah ester asetat dari selulosa. Zatnya mempunyai karakteristik dari seluloid dan memenuhi persyaratan sebagai bahan pelambat api dalam penggunaan. Yang mengandung 32–40% asetil dapat digunakan sebagai resin. Ini adalah bahan yang sangat kuat dengan isolasi listrik dan ketelitian dimensi yang tinggi, mudah diberi warna dan sangat mengkilap. Perbedaannya dari seluloid adalah stabil terhadap panas dan mudah dibentuk pada cetakan panas. Untuk film foto, sesulosa triasetat dengan 59–61,5% derajat asetilasi dan larutan metilen khlorida sebagai bahan pemlastis digunakan untuk membentuk film, yang kemudian dikeringkan.

(b) Penggunaan

Bahan ini digunakan secara luas dalam bidang yang semula menggunakan seluloid, seperti kerangka kaca mata, pegangan, mainan, alat-alat listrik, komponen dan film foto. Baik selulosa triasetat atau selulosa asetat sekunder digunakan sebagai serat.

(3) Turunan lain

(a) Selulosa asetat butirat yang menggunakan asam asetat dan asam butirat, dan ester selulosa propionat

Bahan-bahan ini unggul dalam kilap, ketahanan terhadap cuaca, tahan air, kemampuan pemrosesan, ketelitian dimensi dan ketahanan benturan dibandingkan dengan asetil selulosa, tetapi hanya sedikit yang dibuat karena masalah harga.

(b) Etil selulosa

Ini adalah etil eter dari selulosa, dan paling cocok dengan etilasi sebesar 44,5–48%. Bahan ini merupakan resin turunan selulosa yang paling ringan (massa jenis 1,14), kuat dan kurang terdegradasi dalam sifat mekaniknya pada temperatur rendah. Bahan ini baik dalam ketahanan air, transmisi cahaya, sifat isolasi listrik dan ketahanan impak, dan tahan terhadap alkali. Bahan ini juga digunakan untuk alat olah-raga, komponen listrik dan perkakas.

[Selopan]

Ini adalah film selulosa yang dibuat dari viskosa. Mempunyai sifat tembus cahaya dan sifat isolasi listrik yang baik. Digunakan sebagai bahan pengemas.

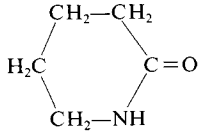
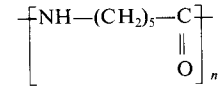
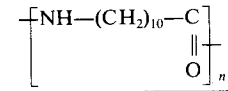
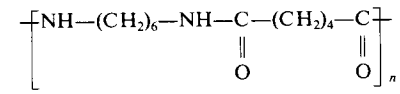
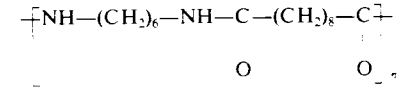
2.2 Plastik industri

Bahan ini adalah plastik yang dapat digunakan dalam kondisi yang agak kasar, sebagai bahan dan bagian-bagian untuk industri. Berbagai macam bahan sekarang dikembangkan dan banyak digunakan secara efektif sebagai komponen, dengan menggunakan sifatnya yang ringan, kemampuan dibentuk yang baik, meredam suara, lubrikasi dan tahan abrasi.

2.2.1 Poliamid (Nylon)

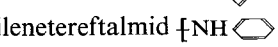
Poliamid (Nylon) adalah resin dengan ikatan amida –NH–Co–, dan dari strukturnya dapat dibagi menjadi $\{NH\text{-}R\text{-}NHCO\text{-}R'\text{-}CO\}_n$ dan $\{NH\text{-}R\text{-}CO\}_n$. Yang pertama adalah polikondensat dari amin dan asam dikarboksilat yang disebut Nylon *m*, *n*, dengan *m* yang menyatakan jumlah karbon dalam diamin dan *n* dalam

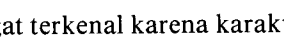
Tabel 3.33 Jenis poliamid.

Polimerisasi	Poliamid	Bahan	Rumus struktur
a) Bahan cincin polimerisasi dari laktam	Poliamid 6	 (ε-Kaprolaktam)	
b) Polimerisasi dari asam amino karboksilat	Poliamid 11	$H_2N-(CH_2)_{10}-COOH$ (ω-Asamaminoundekanoik)	
c) Polimerisasi dari diamin dan asam dikarboksilat	Poliamid 66	$H_2N-(CH_2)_6-NH_2$ (Heksametilin diamin) $HOCC-(CH_2)_4-COOH$ (Asam adipik)	
	Poliamid 610	$H_2N-(CH_2)_6-NH_2$ (Heksametilen diamin) $HOOC-(CH_2)_8-COOH$ (Asam sebasik)	
	Kopolimer		Poliamid di atas adalah bahan dikopolimerkan
	Poliamid campuran		Poliamid di atas diaduk

asam dikarboksilat. Yang terakhir didapat dari polikondensasi asam aminokarboksilat atau karena polimerisasi pembukaan cincin dari laktam, dan disebut Nylon *m*, dengan *m* sebagai jumlah karbon dalam asam amino karboksilat atau laktam. Jadi banyak jenis yang terdapat dalam poliamid (Nylon). Sintesis dapat dilaksanakan menurut berbagai cara, tetapi secara praktis hanya beberapa yang dibuat seperti ditunjukkan pada Tabel 3.33.

Di samping itu, nilon alisiklik dan nilon aromatik, juga digunakan terutama untuk serat dan film. Yang terakhir ini lebih umum:

m-fenilenisoftalamid  (Nomex, Conex) dan

p-fenilenetereftalmid  (Kevlar)

yang sangat terkenal karena karakteristeriknya ialah tahan panas, kekuatan tinggi dan modulusnya tinggi, maka bahan ini banyak digunakan untuk bahan komposit dan bahan iosolasi listrik.

(1) Sifat

Tabel 3.34 menunjukkan sifat khas dari nilon yang dipakai sebagai resin industri. Masing-masing bahan tersebut kuat dan unggul dalam pelumasan, ketahanan abrasi dan ketahanan kimia, tetapi akibat sifat serap airnya, maka kestabilan dimensinya dan sifat listriknya jelek. Bahan-bahan tersebut agak berubah mikro strukturnya (struktur kristalin, kristalinitas). Struktur kristalin dapat berubah oleh kedudukan dan jumlah ikatan hidrogen yang terbentuk antara $\gtrless CO- \ldots NH \lesseqgtr$ dalam nilon, yang sangat dipengaruhi oleh jumlah karbon *m*, *n*, dsb.

Kristanilitas dikatakan ada 30–35% di bawah kondisi cetakan umum dengan nilon 66, 20–25% dengan nilon 6 dan 610, dan kristal mudah dibentuk menurut $66 > 610 > 6 > 12$. Pada kondisi cetakan tertentu, khususnya bila didinginkan perlahan-lahan, sering terbentuk sperulit, yaitu suatu agregat kristalin dengan orde

Tabel 3.34 Sifat-sifat Nilon.

Sifat-sifat		Nilon 6			Nilon 66		Nilon 6 10*	Nilon 11*	Nilon 12*
		Kering mutlak	Kadar air keseimbangan (3,5%)	Diperkuat dengan 30% serat gelas*	Keadaan kering mutlak	Kadar air keseimbangan (2,5%)			
Masa jenis	g/cm^3	1,14	—	1,37	1,14	—	1,08	1,04	1,02
Kekuatan tarik	kg/cm^2	780	350	1.900	830	550	600	500	430
Perpanjangan	%	200	250	5,8	60	200	85	230	230
Kekuatan lentur	kg/cm^2	1.250	385	2.550	1.300	650	950	500	590
Modulus Young pada lenturan	kg/cm^2	28.400	8.300	75.000	33.000	12.000	23.600	11.000	12.200
Kekuatan tekan 1% deformasi	kg/cm^2	220	55	425	345	90	210	—	—
Kekuatan impak (Izod, ditakik)	kg.cm/cm	8	>56	8,8	4	14	5,6	5	5
Kekerasan Rockwell	H_R	R114	R85	R120	R118	R100	R113	R100	R105
Temperatur alir	°C	206	—	225	249	—	203	—	—
Koefisien muai panjang	10^{-4} /°C	0,8	—	—	1,0	—	1,2	1,5	1,5
Koefisien konduktivitas termal.	kcal/m.hr.°C	0,18	—	—	0,21	—	0,19	0,25	0,21
Temperatur distorsi panas (beban: 18,5 kg/cm^2)	°C	55–58	—	195	58–61	—	51–56	55	51
Ketahanan volume	Ω.cm	7×10^{14}	3×10^{12}	2×10^{14}	$4{,}5\times10^{13}$	—	4×10^{14}	6×10^{13}	8×10^{14}
Kekuatan putus dielektrik (waktu singkat)	kV/mm	31	—	27	15,4	—	28	17	33
Konstanta dielektrik (10^3 Hz)		4,0	—	3,0	3,9	—	3,6	3,7	3,6
Faktor daya dielektrik (10^3 Hz)		0,06	—	0,03	0,02	—	0,04	0,05	0,04
Absorpsi air (30°C, 24 jam)	%	2,9	—	1,2	1,5	—	0,5	0,5	—

* Data didapat pada keadaan kering mutlak.

Tabel 3.35 Perubahan sifat karena meningkatnya kristalinitas dan sperulit dari nilon.

Sifat-sifat	Kekuatan mulur	Kekuatan tarik	Kekuatan impak	Perpan-jangan	Modulus Young pada lenturan
Peningkatan kristalinitas	Naik	Naik	Turun	Turun	Naik
Peningkatan sferulit	Turun	—	Turun	Naik	Turun

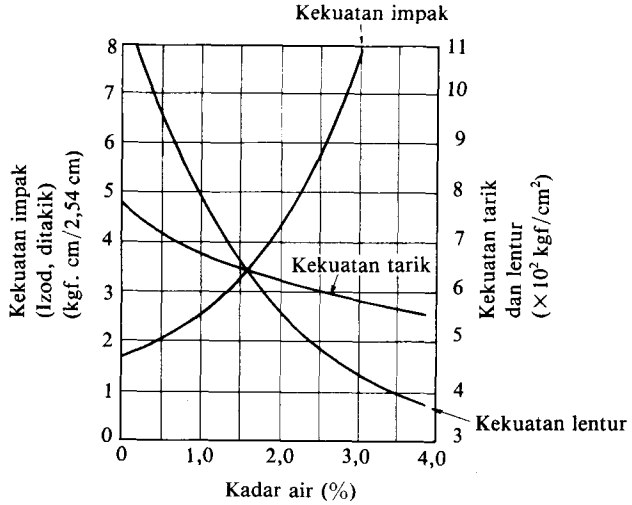
tekstur yang tinggi. Kristalinitas dan ukuran sperulit memberikan efek tertentu terhadap sifat mekanik. Seperti ditunjukkan pada Tabel 3.35 kristalinitas tinggi menghasilkan sifat tidak tembus cahaya kekakuan tinggi, ketahanan abrasi dan pelumasan yang lebih baik, maupun koefisien ekspansi termal dan kapasitas absorpsi air yang lebih kecil. Namun demikian, bila struktur sperulit, suatu agregat besar, terbentuk, maka sifat mekanik, khususunya ketahanan impak, dsb, menjadi buruk. Karena itu diinginkan untuk mempunyai sejumlah kristal mikro yang terdistribusi secara homogen dalam seluruh bagian dari cetakan.

(a) Absorpsi Air

Karena gugus amida hidrofilik, nilon adalah higroskopik. Makin tinggi kristalinitas dan makin kecil jumlah gugus amida yang ada, semakin kecil sifat higroskopiknya. Jadi, pada kristalinitas yang sama, sifat higroskopik makin membesar menurut urutan 12 < 11 < 610 < 66 < 6. Pada 20°C, 65% RH, kira-kira nilon 6→3,5%, 66→2,15%, 610→1,5%, 12→0,75%. Dengan bahan yang tebal diperlukan waktu kira-kira setahun, untuk sampai pada kadar lembaban pada kesetimbangan. Gb. 3.19 menyatakan perubahan dari kelengketan akibat absorpsi air. Lembaban bertindak sebagai pemlastis, misalnya ia menurunkan titik transisi gelas T_g. Selanjutnya, mengenai kestabilan dimensi dari cetakan, dengan absorpsi air sebanyak 1%, maka dimensi bertambah (membengkak) sebesar 0,2% dengan nilon 6 dan 0,25% dengan nilon 66.

(b) Sifat mekanik

Dalam Tabel 3.34 yang terdahulu telah dinyatakan sifat mekanik yang khas. Nilon lebih unggul dalam kekuatan tarik dan ketahanan impak dan masuk golongan



Gb. 3.19 Perubahan kekuatan oleh absorpsi air pada Nilon 6.

ketahanan abrasi dan pelumasan yang paling menguntungkan di antara berbagai resin. Bahan-bahan ini agak bervariasi dalam kristalinitas, struktur kristalin dan absorpsi air. Misalnya, bertambahnya kristalinitas menyebabkan koefisien gesekan makin kecil dan ketahanan abrasi makin besar. Namun demikian, kristal dan sperulit tak akan terbentuk.

(c) Sifat kimia

Bahan ini tidak larut, dalam alkohol, alkali, eter, hidrokarbon, keton dan detergen, tetapi larut dalam fenol dan asam format. Ketahanan asam dari nilon jelek, dan mudah dihidrolisa oleh asam-asam anorganik. Film nilon dapat melewatkan uap air, tetapi tak banyak melewatkan oksigen, nitrogen, gas karbon dioksida dan sebagainya.

(d) Sifat listrik

Karena bersifat higroskopik, sifat listrik rusak karena absorpsi air bertambah. Tahanan volume berkurang kira-kira 1/10 nya dengan bertambahnya air sebesar 1%. Di samping itu, bila serat gelas ditambahkan sebagai aditif, maka kekuatan tarik, lentur dan impak akan diperbaiki lebih lanjut. Bila suhu deformasi termal naik, maka bahan menjadi kurang peka terhadap pengaruh panas dan air. Kestabilan dimensi juga bertambah baik karena keausan abrasi bertambah.

(e) Kemampuan cetak

Karena polimer bersifat kristalin, temperatur pelunakannya berdaerah sempit. Kalor pelelehan tinggi. Karena viskositas lelehan sangat tergantung temperatur, temperatur penguraian berada dekat pada titik leleh, maka temperatur harus dikontrol ketat. Pada pencetakan, perlakuan panas dapat diberikan untuk menghilangkan tegangan sisa dan meningkatkan kristalinitas, dengan pemanasan dalam parafin cair atau minyak pengeras terhadap kelebihan air pada 10–20°C lebih tinggi dari pada temperatur kerja. Karena sifat higroskopis, air harus dihilangkan sebelum pencetakan polimer dilakukan.

(f) Penggunaan

Kebanyakan bahan digunakan dalam bentuk serat. Bahan ini masa jenisnya kecil, koefisien gesek tinggi, kekuatan tekuk dan kekuatan simpulnya tinggi dan kepermanenan yang baik. Sebagai serat industri, nilon banyak digunakan untuk pembuatan tambang, benang ban mobil, jaring ikan, ban konveyor dan sebagainya.

Bahan ini banyak digunakan juga untuk sandang, tetapi akhir-akhir ini poliester secara kuantitatif lebih banyak dipakai dari pada nilon. Bahan ini lebih unggul dalam kemampuan pewarnaan dan ketahanan abrasi.

Sebagai resin, karena unggul dalam pelumasan dan ketahanan abrasi, maka

Tabel 3.36 Penggunaan poliamid sebagai plastik.

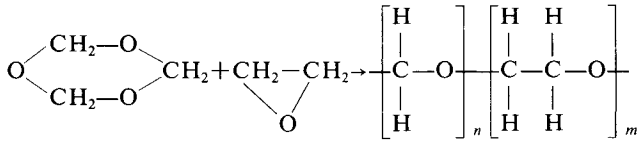
Komponen mesin pintal	Roda gigi, rol, kam, selubung, penuntun, dst.
Komponen mobil	Komponen: karburator, pompa bahan bakar, pipa-pipa bensin, pipa oli, kipas, tangki cadangan, roda gigi, rol, selubung, tangki bensin, dst.
Komponen mesin umum	Roda gigi, selubung, kam, rol, selang tahan tekanan, kotak batere, kerangka, puli motor, dst.
Komponen bahan konstruksi	Komponen: daun jendela kaca, rol, kunci, tirai, dst.
Barang-barang kecil	Tempat tinta, payung, tangki gas propan, tangki minyak pelumas, kancing, dst.
Alat olah raga	Sol sepatu, paku, roda gigi, alat pancing, pelana sepeda, dst.

banyak digunakan untuk bantalan, bantalan luncur, roda gigi tanpa bunyi dan mengabsorb getaran, kam dan komponen mesin pintal seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.36.

2.2.2 Poliasetal

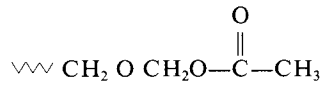
Bahan ini adalah resin termoplastik yang kristalin dengan struktur polieter yang terdiri dari rantai molekular gugus metilen $\{CH_2\}$ dan oksigen $\{O\}$ yang berulang. Formaldehid dipolimerkan dengan berbagai katalis menjadi homopolimer molekular yang tinggi (Delrin).

$n \cdot CHO \rightarrow \{CH_2O\}_n$, dalam mana gugus molekul terminal diesterifikasi agar stabil. Di lain fihak kopolimer dibuat dari trioksan sebagai bahan pemula dengan polimerisasi pembukaan cincin dengan katalis. Pada saat ini beberapa persen etilen oksida ditambahkan dan dikopolimerkan (Duracon).



Trioksan Etilen oksida Kopolimer

Homopolimer (Delrin) distabilkan karena mempunyai gugus terminal:



(1) Sifat

Kedua zat ini mudah diserang oleh asam klorida encer, asam nitrat encer dan 10–20% asam asetat. Bahan mempunyai kristalinitas baik, sebagai molekul tak bercabang, dan mempunyai ikatan hidrogen antara molekul-molekulnya. Keseragaman molekular dari kopolimernya kurang baik, kristalinitas, titik leleh dan berat jenisnya rendah. Bila dibandingkan dengan polikarbonat, maka kekuatan tarik dan kekuatan tekuknya hampir sama, unggul dalam kekuatan tekan dan agak kurang dalam ketahanan impaknya. Bahan mempunyai modulus elastik yang tinggi, karena kuat seperti pegas logam. Bahan ini termasuk kelompok bahan dengan ketahanan lelah paling tinggi, dan ketahanan abrasinya baik setelah nilon. Ketahanan dingin bahan ini juga baik, menunjukkan ketahanan impak baik pada $-50°C$, dan ketahanan melarnya juga baik. Suhu deformasi termal adalah 124°C. Bahan terurai pada atau di atas 220°C dan melepaskan gas formalin. Sifat listriknya tidak khas secara khusus.

Sebagai sifat kimia yang dapat dicatat adalah ketahanan terhadap pelarut yang baik, hanya dapat larut dalam fenol terklorinasi pada suhu tinggi. Namun demikian, seperti telah diutarakan di atas, lemah terhadap asam dan malahan terhadap sinar UV, jadi pencampuran dengan inhibitor diperlukan agar degradasi UV dapat dikurangi. Poliasetal bersifat tidak dapat padam sendiri bila dibakar dan melepaskan bau formalin yang kuat, sehingga orang harus hati-hati. Hal ini dapat diperbaiki dengan mencampurkan serat gelas yang akan meningkatkan koefisien elastik 2–3 kali dan menaikkan suhu deformasi termal sebesar 30–40°C.

(2) Kemampuan cetak

Temperatur pencetakan adalah 190–220°C dan temperatur cetakan adalah kira-

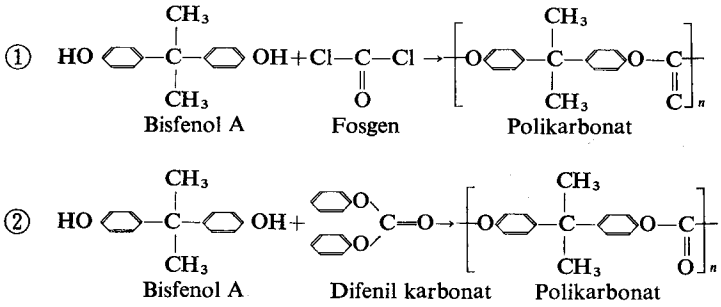
kira 120°C untuk kompolimer, sedangkan kopolimer memerlukan temperatur yang lebih rendah yaitu masing-masing 180–210°C dan 80°C. Karena bahan terurai oleh pemanasan yang terlalu lama dan melepaskan formalin, maka perlakuan harus diselesaikan dalam waktu pendek. Bahan ini tergolong dalam kelompok dengan penyusutan pencetakan tertinggi 1–3,5%. Hal ini perlu diperhatikan.

(3) Penggunaan.

Bahan ini unggul ditinjau dari kekuatan, ketahanan lelah, ketahanan melar dan ketahanan abrasi. Bahan juga lebih ringan dari pada logam, unggul dalam ketahanan air, pelumasan diri, dan menguntungkan dalam kemampuan pencetakan, sehingga bahan ini digunakan secara luas untuk roda gigi, bantalan, kam, roda ban, sekerup, penguat dan komponen mesin lainnya, mesin keperluan kantor, komponen mesin produksi, mobil dan bahan bangunan.

2.2.3 Polikarbonat aromatik

Ini adalah resin termoplastik dengan ikatan polikarbonat aromatik.



Zat ini dihasilkan oleh metoda fosgen, reaksi pertukaran ester, dan lain-lain. Rantai molekul yang mempunyai gugus aromatik, adalah kaku lebih kristalin dan terikat kuat. Karena terikat dengan ikatan ester, maka ketahanan alkalinya lemah. Massa jenisnya 1,2, tak berwarna atau berwarna kecoklat-coklatan dan tembus cahaya. Kekerasan Rockwell menunjukkan kira-kira 87–91 dalam skala M dan 92–97 dalam skala L. Bahan bersifat dapat padam sendiri apabila dibakar.

(1) Sifat

Bahan ini dalam sifat mekanik, khususnya sangat baik dalam ketahanan impak, dan ternyata yang terbaik antara resin yang tak terisi. Namun demikian, ketahanan lelah bahan ini kurang baik dibandingkan dengan ketahanan lelah poliasetal dan nilon. Kekuatan tariknya kira-kira sama dengan poliasetal, sedangkan kekuatan tekuk dan kekuatan tekan agak lebih baik dari rata-rata. Bahan ini memiliki kekhasan bahwa sifat mekanik kurang bergantung pada temperatur. Selanjutnya temperatur deformasi termal dengan beban 18,5 kgf/cm^2 dan 4,6 kgf/cm^2 adalah 132°C dan 140°C, lebih tinggi dari pada nilon. Tabel 3.37 menunjukkan karakteristik termal dari berbagai jenis plastik. Temperatur kegetasan antara -100 dan -140°C, jadi bahan tersebut dapat digunakan untuk daerah temperatur yang luas.

Dengan mengingat sifat-sifat listriknya, maka bahan ini banyak digunakan dalam teknik listrik karena tak ada perubahan banyak dalam konstanta dielektrik dan tan δ oleh temperatur dan frekuensi di samping sifat mekanik yang unggul.

Bila ditinjau sifat kimianya, maka absorpsi air lebih besar dari poliolefin seperti

Tabel 3.37 Karakteristik termal bahan plastik.

Plastik	Pecah ~ temperatur distorsi panas (Beban: 4,6 kg/cm^2) (°C)
Polietilen masa jenis rendah	−30 ~ (32–41)
Polietilen masa jenis tinggi	−30 ~ (43–54)
Polipropilen	(−50 ~ −20)–(93–110)
PVC impak tinggi	−40 ~ (57–82)
Nilon 6	(−50 ~ −75)–(149–185)
Polikarbonat	< −100 ~ (132–143)
Poliasetal	−50 ~ (158–170)
Karet silikon	−75 ~ 200
Lapis silikon	−75 ~ 260
Politetrafluoroetilen	−260(tetap fleksibel pada −100°C) ~ (177–179)
Etilen vinilasetat kopolimer	−5(tetap plastis) ~ (60–64)
Oksida polifenilen	−170 ~ 191
Karet alam	0–99
Karet stiren-butadien	−30 ~ 149
Karet skrilonitril-butadien	−30 ~ 149
Karet kloropren	>0°C ~ 149
Karet butil	−30 ~ 149

pada polietilen, tetapi masih lebih kecil daripada resin yang lain. Penggunaan terus menerus pada atau di atas 60°C, 95% R.H., akan menghasilkan degradasi kimia, yang harus dicegah. Zat ini tak larut dalam hidrokarbon alifatik dan alkohol, dan dapat larut atau membengkak dalam hidrokarbon aromatik, ester dan keton. Zat ini larut baik dalam hidrokarbon terkalorinasi seperti metilen klorida, kloroform, dsb. Selanjutnya mudah dirusak oleh alkali kuat malahan kadang-kadang oleh alkali lemah juga seperti amonia, amin, dsb.

Dengan asam kuat juga diharapkan terjadi kerusakan secara bertahap, tetapi cukup tahan terhadap asam lemah. Bahan ini mempunyai ketahanan yang baik terhadap cuaca, dan dalam hal benda cetakan, degradasi tak akan melebihi permukaannya saja.

(2) Kemampuan cetak

Dengan titik leleh yang tinggi (220–230°C), maka temperatur cetakan dari polikarbonat adalah 240–300°C. Karena temperaturnya dekat pada temperatur penguraian (±320°C), maka bahan akan menjadi coklat dan menyebabkan degradasi termal, hal ini perlu perhatian. Namun demikian, bila cukup dikeringkan dan disekat terhadap udara, degradasi akan diperlambat. Karena viskositas lelehan cukup tinggi dan sangat tergantung pada temperatur, maka pengontrolan temperatur harus mendapat perhatian yang baik. Penyusutan cetakan polikarbonat adalah sebesar 0,5–0,7%, dan perubahan dimensi yang berarti untuk waktu yang lama tak terjadi. Namun demikian, untuk bentuk yang rumit, dapat terjadi retakan akibat tegangan sisa. Untuk mencegah hal ini maka benda harus dianil pada 120–130°C. Dengan perlakuan panas demikian, kekuatan tekuk dan kekuatan tarik bertambah, sedangkan kekuatan impak agak turun, hal mana perlu diketahui.

(3) Penggunaan

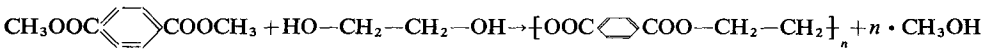
Dengan memanfaatkan sifat-sifat unggul demikian itu, polikarbonat dipergunakan secara luas untuk komponen elektronik dan listrik, misalnya untuk: tombol kontak, penutup, komponen komputer, mesin listrik, kipas listrik, dsb.

Demikian juga dalam bidang mekanik digunakan secara luas dan efektif untuk

berbagai struktur, kipas, sambungan pipa, mesin jahit, berbagai alat ukur, topi pelindung, badan kamera, dsb. Juga digunakan di luar untuk alat lampu lalu-lintas, papan isyarat, rangka jendela, film, lembaran tipis, barang-barang kecil, maupun untuk alat-alat yang memerlukan kekuatan impak yang besar seperti botol, alat makan, hak sepatu wanita, paku dan banyak yang lainnya lagi.

2.2.4 Resin poliester termoplastik jenuh

Ini adalah resin termoplastik berantai lurus dengan ikatan ester $-O-\overset{\overset{O}{\|}}{C}-$ dalam rantai utama. Polietilen tereftalat (PET) adalah yang paling umum.



Dimetil tereftalat Etilen-glikol Polietilen tereftalat

Di samping itu dikenal pula polibutilen tereftalat (PBT). Jenis ini adalah resin untuk penggunaan umum.

(1) Sifat-sifat

Dengan permukaan yang halus mengkilat, titik leleh yang relatif tinggi, maka bahan ini ungul dalam kestabilan dimensi karena serapan airnya dan koefisien ekspansi termalnya rendah. Bahan mempunyai kekakuan tinggi, kekuatan mekanik yang unggul, tinggi dalam: ketahanan impak, ketahanan abrasi, koefisien gesek, ketahanan melar, ketahanan retak tegangan, ketahanan cuaca juga baik. Sifat-sifat tersebut di atas tampaknya seimbang dengan baik.

Film PET unggul dalam kekuatan dan kestabilan dimensi, kuat dalam: impak, penyobekan dan penekukan, menguntungkan dalam sifat tembus cahayanya dan dapat digunakan dalam daerah perubahan yang lebih luas bagi temperatur dan kelembaban.

Bahan mempunyai sifat termal yang baik, mempunyai ketahanan terhadap panas dan dingin, tetapi setelah melewati titik transisi gelas (T_g=78°C) diharapkan ada beberapa perubahan yang harus diperhatikan. Bila diperkuat dengan serat gelas, ketahanan panas akan lebih baik.

Dalam sifat-sifat listriknya, mempunyai tahanan volum yang relatif rendah, demikian juga tan δ, dan ketahanan busur listrik. Untuk frekuensi tinggi, faktor dayanya menjadi agak lebih tinggi.

Mengenai ketahanan kimianya, bahan tersebut mudah membentuk atau larut asam trifluoroasetat, fenol, m-kresol dan tetrakloroetan. Secara khusus terurai baik dalam asam sulfat pekat maupun dalam asam nitrat. Bila dipanaskan pada suhu tinggi dengan adanya air, bahan akan terhidrolisa. Kepermeabelan gasnya pada umumnya rendah.

(2) Kemampuan pemrosesan

Zat penginti, dsb., digunakan bersama-sama. Cara pemrosesan adalah dengan pencetakan injeksi pada 250–290°C, pada temperatur cetakan 140°C. Film berorientasi secara biaksial oleh proses ekstrusi. Dengan menggunakan PET yang dikeringkan mula secukupnya untuk menghilangkan lembaban, maka bahan dapat diekstrusi dan diorientasi secara biaksial pada temperatur yang cocok.

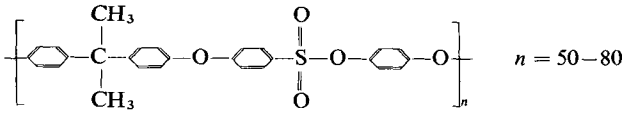
(3) Penggunaan

Bahan ini kebanyakan digunakan untuk serat dan film maupun untuk botol, pada

masing-masing bahan dinyatakan sifat-sifat unggulnya. Keperluan dalam setiap bidang meningkat sangat besar. Film digunakan untuk komputer, video, kaset, fotografi, bahan pengemas, isolasi listrik, kondensor, hiasan yang dilapisi logam, isolasi panas, dsb. Produksi tertinggi yang tercatat adalah serat sintetik. Benda cetakan digunakan untuk menggantikan benda coran logam, tetapi benda tersebut kurang bila dibandingakan dengan serat, film dan botol.

2.2.5 Polisulfon

Bahan ini didapat secara polikondensasi diklorodifenil sulfon dan bisfenol A. Bahan ini disebut polisulfon karena mengandung gugus $-\overset{\overset{O}{\|}}{\underset{\underset{O}{\|}}{S}}-$



(1) Sifat-sifat

Bahan ini sukar dioksidasi karena adanya gugus sulfon, sukar dibentuk hampir-hampir tak terurai oleh panas. Cincin aromatik dan ikatan eter (-C-O-C-) dalam rantai utama memberikan kekakuan. Temperatur deformasi termal adalah 174°C. Bahan dapat digunakan sampai 150°C. T_g adalah 190°C, temperatur kerapuhan −100°C, dan ketahanan melar pada temperatur tinggi lebih baik. Bahan unggul dalam ketahanan kimia, tak diserang oleh asam mineral, alkali dan garam, tetapi, diserang oleh keton, hidrokarbon terklorinasi dan pelarut polar lainnya, maupun oleh hidrokarbon aromatik. Sifat listrik tak berubah banyak mulai dari temperatur biasa sampai 175°C. Meskipun berada pada temperatur tinggi (kira-kira 150°C) untuk waktu yang lama (kira-kira setahun), modulus tarik tak menunjukkan perubahan banyak, kira-kira 85% dari sifat listrik dan 80% dari kekuatan impak dapat dipertahankan.

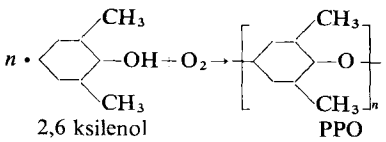
(2) Kemampuan cetak

Bahan harus dikeringkan secukupunya sebelum pencetakan. Karena suhu pelelehan dan viskositas secara nyata lebih tinggi dari pada resin lain, maka pada pencetakan perlu dipertahankan temperatur tinggi sekitar 345–400°C.

(3) Penggunaan

Bahan digunakan untuk komponen listrik, komponen mekanik dan komponen mobil, karena penggunaannya yang paling cocok pada kondisi termal yang sangat berat. Sebagai plastik teknik dengan sifat-sifat mekanik, listrik dan kimia yang unggul, bahan ini digunakan secara luas.

2.2.6 Polifenilen oksida (PPO)



2,6 ksilenol PPO

(Nama dagang: Noryl)

PPO unggul dalam kekuatan, ketahanan panas dan sifat listrik, tetapi tak begitu baik dalam kemampuan cetaknya.

(1) Sifat

Bahan mempunyai sifat yang tinggi dalam: modulus tarik, kekuatan tarik, tegangan mulur, dan regangan patah. Resin ini kaku dan sangat kental. Temperatur deformasi termal adalah 174°C (18,6 kgf/cm^2), setinggi polisulfon dan 150°C dalam penggunaan dengan pembebanan yang berhenti-henti. Absorpsi air dapat diabaikan. Ketahanan melar agak lebih baik dari pada polikarbonat. Bahan mempunyai masa jenis rendah sekitar 1,06. Bersifat dapat padam sendiri, tak tembus cahaya, dan temperatur cetak 290–350°C. Mempunyai sifat listrik yang baik. Sifat khas dielektrik bervariasi luas antara 60 Hz sampai 1.000 kHz, dari −60° sampai 160°C, dan faktor daya dielektrik kecil sekali. Tahanan volum dan kekuatan putus dielektriknya tinggi. Unggul dalam ketahanan air dan ketahanan kimia, mengembang dan larut dalam hidrokarbon terklorinasi, hidrokarbon aromatik, dsb.

2.3 Polimer lain

2.3.1 Fluoropolimer

(1) Politetrafluoroetilen (PTFE)

$$2\,CHClF_2 + CF_2{=}CF_2 \rightarrow \{CF_2\text{-}CF\}_n$$

Freon 22

Ketahanan listrik (khususnya sifat khas frekuensi tinggi) baik sekali, unggul dalam ketahanan panas dan ketahanan dingin. Indeks ketahanan abrasi rendah sekali yang berarti bahwa bahan tak saling melekat dengan zat lain. Resin ini secara kimia stabil dengan kristalinitas sangat tinggi. Warnanya putih seperti lilin, lebih keruh dari pada polietilen. Bahan ini merupakan resin terberat di antara resin yang dipergunakan dalam praktek, massa jenisnya 2,1–2,3.

Sifat mekaniknya hampir sama seperti polietilen bermasa jenis tinggi. Temperatur deformasi termal pada 4,6 kgf/cm^2 adalah 120°C dapat digunakan untuk waktu lebih lama pada 90 sampai 260°C. Ketahanan panasnya sekitar 288°C. Kristalinitasnya hilang bila melewati 300°C, dan kekuatan tariknya berkurang sangat cepat. Perubahan volume karena suhu dapat diamati. Mengenai sifat kimianya, zat ini hanya diserang secara bertahap oleh logam alkali dan oleh gas fluor yang tinggi konsentrasinya, tetapi tak pernah diserang oleh aqua regia, asam nitrat panas, asam sulfat panas dan soda kaostik panas berkonsentrasi tinggi, karena merupakan resin terkuat. Karena tak larut dalam pelarut, maka kemampuan pemoresannya jelek. Ketahanan melar dan ketahanan abrasi tak selalu menguntungkan.

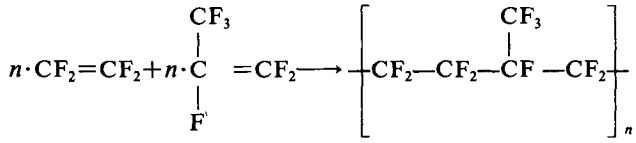
Mengenai sifat listriknya, bahan ini unggul dalam isolasi listrik, dan kurang dipengaruhi oleh temperatur dan kelembaban.

Dengan menggunakan ketahanan kimia yang terbaik, bahan ini secara luas digunakan untuk gasket, pembungkus, selang dan pipa. Umurnya dapat dikatakan semi permanen. Dengan memanfaatkan ketahanan geseknya yang rendah, bahan ini banyak digunakan untuk dudukan katup, bantalan, cincin torak, dsb. Cukup banyak digunakan untuk penggoreng yang tak-lekat, seterika dan alat rumah tangga lainnya. Secara luas dipergunakan sebagai komponen listrik yang tak terdegredssi. Juga digunakan untuk pembuluh darah buatan dan material lain yang vital.

(2) Kopolimer fluoroplastik

Dalam usaha untuk mendapatkan plastik yang sama seperti PTFE dengan kemam-

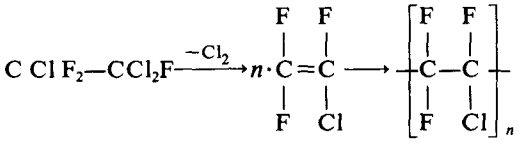
puan pemrosesan yang lebih baik, suatu kopolimer etilen fluorida dan polipropilen fluorida telah dikembangkan.



Etilen fluorida Polipropilen fluorida

Zat ini mempunyai sifat yang sama seperti PTFE, tetapi jelek dalam ketahanan panas dan sifat-sifat listriknya. Kemampuan cetak tak menguntungkan, tetapi pencetakan ekstrusi dan injeksi lebih memungkinkan. Penampilannya seperti PTFE dengan sifat tembus cahaya yang agak baik. Sifat mekaniknya menyerupai benar PTFE. Ketahanan panasnya rendah kira-kira 240°C. Sifat listriknya: tangens δ tinggi, tetapi sifat frekuensi tingginya kurang baik. Zat ini secara relatif tahan terhadap bahan kimia organik dan anorganik. Dengan memanfaatkan kemampuan cetaknya, bahan ini banyak digunakan dalam bidang yang sama seperti PTFE. Bahan ini dapat ditekan menjadi film.

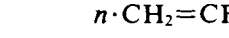
(3) Poliklorotrifluoroetilen (PCTFE)



(PCTFE)

Bahan ini mempunyai sifat tembus cahaya yang lebih baik dari pada PTFE. Sifat mekaniknya sama seperti PTFE. Sangat baik dalam isolasi listrik, tetapi jelek sifat frekuensi tingginya. Suhu yang digunakan terletak antara −50°C sampai 180°C. Ketahanan kimianya kurang pada PTFE, dan mengembang dalam pelarut halida. Kemampuan cetaknya baik.

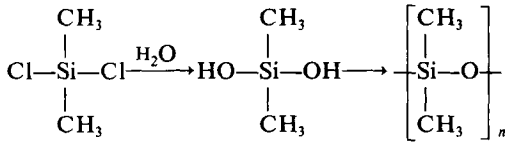
(4) Poliviniliden fluorida (PVDF)



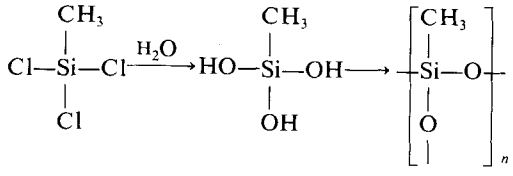
Bahan ini umumnya transparan dan unggul terhadap ketahanan cuaca, baik untuk penggunaan di luar maupun tahan terhadap penyinaran. Bahan mudah diproses dan dibentuk menjadi film, tetapi sifat listriknya pada frekuensi tinggi kurang baik.

2.3.2 Resin silikon

Bahan ini merupakan polimer silikon organik yang didasarkan atas ikatan silikon (≥Si-O-Si≤). Sifat-sifatnya terdapat antara gelas dan senyawa organik.



Dimetil diklorosilan Dimetil silanol Polidimetilsiloksan (Polimer silikon rantai lurus)



Monometil klorosilan | Monometil silanol | Struktur jaringan polimer silikon

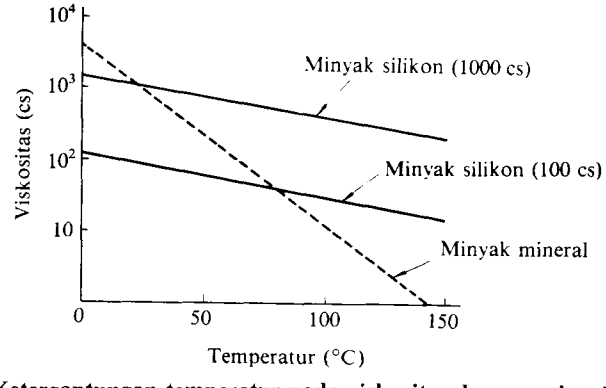
Bergantung pada banyaknya, gugus -OH (dengan menggunakan rantai cabang yang berlainan), maka dapat dibuat polimer berantai lurus dengan struktur jaringan yang memiliki berbagai sifat menyerupai resin, menyerupai minyak dan menyerupai karet. Silikon mempunyai kestabilan termal yang sangat baik yang tak dapat dicapai oleh bahan organik lain baik sebagai cairan, padatan kenyal atau padatan resin.

Sifat mekaniknya kurang berubah-ubah dengan perubahan temperatur, dan khususnya menguntungkan dalam keadaan minyak. Dalam keadaan seperti karet, suatu kekenyalan untuk daerah yang luas yaitu dari $-55°C \sim 250°C$ dapat dipertahankan. Sifat antarmuka silikon adalah khas karena baik terhadap sifat tolak air, antibusa, karakteristik pelepasan cetakan, dan mampu memperbesar sudut kontak dengan air sampai $90° \sim 110°$. Tambahan lagi, bahan ini unggul dalam sifat isolasi listrik dan kurang bergantung pada temperatur. Bahan ini terdegredasi atau terurai oleh beberapa asam kuat dan alkali kuat. Juga terurai oleh air panas yang mengandung asam dan atau alkali. Karet dan resin mempunyai kekurangan, yaitu mudah mengembang atau retak dalam pelarut hidrokarbon.

(1) Penggunaan

(a) Minyak silikon

Bahan ini mempunyai daerah cakupan yang luas, yaitu dari yang berat molekulnya kecil dengan viskositas rendah sampai yang berat molekulnya besar dengan viskositas tinggi. Campuran bahan-bahan tersebut juga ada. Variasi viskositas dengan temperatur, kurang. Gb. 3.20 menunjukkan perbandingannya dengan minyak mineral. Karena ketahanan listriknya baik, maka bahan ini digunakan sebagai isolasi. Juga digunakan untuk pompa vakum karena tekanan uapnya rendah. Bila ditambahkan dalam jumlah yang sangat sedikit, dapat digunakan sebagai zat anti-busa. Digunakan juga sebagai bahan pemoles dan anti-debu untuk lensa, perabot rumah tangga, badan mobil, dsb. Bila ditambahkan pada cat, maka sifatnya dapat



Gb. 3.20 Ketergantungan temperatur pada viskositas dengan minyak silikon.

ditingkatkan. Digunakan sebagai minyak penyangga dalam alat-alat pengukur atau sebagai bahan pelepas cetakan.

(b) Gemuk dan persenyawaan

Bila suatu pengisi ditambahkan pada minyak silikon akan didapat semacam pasta lunak, yang dapat digunakan sebagai pelumas untuk daerah cakupan mulai $-30°C$ sampai 260°C. Sebagai pengisi, silika gel, sabun litium, karbon hitam, dsb., bahan ini digunakan dan umumnya unggul dalam ketahanan terhadap panas, zat kimia dan lembaban, serta tak mudah menguap.

(c) Resin silikon

Bahan ini digunakan dalam bentuk pernis yang dilarutkan dalam pelarut organik, yang bersifat termoset setelah pemrosesan dan pencetakan. Hasil pencetakan dingin juga ada.

(d) Karet silikon

Ini adalah silikon dengan kerangka tiga-dimensi. Bahan mempertahankan kekenyalannya untuk daerah temperatur luas antara $-115°C$ sampai 260°C, unggul dalam ketahanan terhadap panas, oksidasi, zat kimia dan lembaban maupun sifat listriknya, tetapi agak kurang baik ketahanannya terhadap minyak dan regangan, Bahan ini digunakan untuk karet yang tahan panas atau dingin, material karet untuk industri kimia, dan untuk material yang dilapisi karet yang berfungsi sebagai isolasi terhadap listrik. Sementara itu, sifat mekaniknya kurang baik dibandingkan dengan karet sintetik seperti neopren. Karet jenis yang diawetkan dingin (diawetkan oleh oksigen dan lembaban dalam udara) banyak digunakan sebagai perekat dan penahan bocor pada logam. Bahan ini juga digunakan untuk pembuluh darah buatan dan bahan pengisi berupa padatan yang kenyal dalam bidang kedokteran.

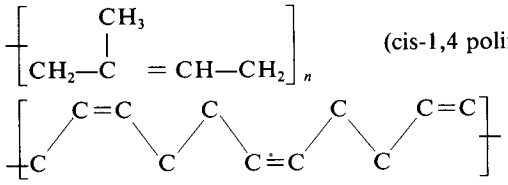
3 KARET

Istilah ini digunakan untuk menyatakan berbagai jenis bahan dengan kekenyalan seperti karet dan bersifat lentur, dapat dideformasikan beberapa kali lebih panjang dan dapat dikembalikan ke bentuk semula.

3.1 Karet alam

Ini dibuat dari sari getah pohon. Sari yang berupa susu dipanaskan sampai kering untuk dibuat karet mentah. Kemudian dimastikasi, diplastiskan agar dapat diproses dengan lebih mudah, dan dicampur pengisi seperti karbon hitam, zat pewarna, belerang, dibuat campuran, dibentuk dengan tekanan, dan divulkanisasi oleh reaksi penyilangan sambil dipanaskan untuk mendapatkan benda cetakan.

Karet alam dianggap polimer dari poliisopren



Di lain fihak, konfigurasi lintas, yaitu guttapercha, tak seperti karet sifatnya melainkan berupa resin kaku, karena struktur ruangnya berbeda, meskipun struktur kimianya sama. Karet alam baik dalam kekenyalam, tinggi kekuatan tariknya dan rendah titik transisi gelasnya (T_g kira-kira-78°C). yang menunjukkan kekenyalan karet yang menguntungkan pada temperatur biasa.

(1) Sifat-sifat

Warnanya agak kecoklat-coklatan, tembus cahaya atau setengah tembus cahaya, dengan berat jenis 0,91–0,93. Sifat mekaniknya tergantung pada derajat vulkanisasi, sehingga dapat dihasilkan banyak jenis sampai jenis yang kaku seperti ebonit. Temperatur penggunaan adalah sekitar 99°C paling tinggi, melunak pada 130°C dan mengurai pada kira-kira 200°C. Sifat isolasi listriknya berbeda karena perbandingan pencampuran dengan aditif, tetapi pada umumnya menguntungkan. Namun demikian, karakteristik listrik pada frekuensi tinggi, jelek. Sifat kimianya jelek terhadap ketahanan minyak dan ketahanan pelarut. Zat tersebut hampir-hampir tak tahan pelarut hidrokarbon, ester asam asetat, dsb. Karet yang kenyal agak mudah didegradasi oleh sinar UV dan ozon. Sejak digunakan selama ini, tak ada masalah dalam kemampuan cetaknya.

(2) Penggunaan

Bahan ini digunakan secara luas untuk ban mobil, pengemas karet, penutup isolasi listrik, sol sepatu dan lain-lainnya.

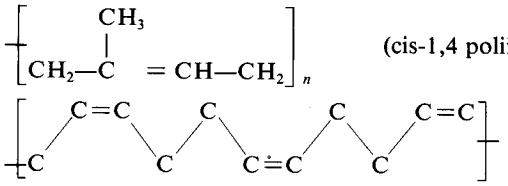
3 KARET

Istilah ini digunakan untuk menyatakan berbagai jenis bahan dengan kekenyalan seperti karet dan bersifat lentur, dapat dideformasikan beberapa kali lebih panjang dan dapat dikembalikan ke bentuk semula.

3.1 Karet alam

Ini dibuat dari sari getah pohon. Sari yang berupa susu dipanaskan sampai kering untuk dibuat karet mentah. Kemudian dimastikasi, diplastiskan agar dapat diproses dengan lebih mudah, dan dicampur pengisi seperti karbon hitam, zat pewarna, belerang, dibuat campuran, dibentuk dengan tekanan, dan divulkanisasi oleh reaksi penyilangan sambil dipanaskan untuk mendapatkan benda cetakan.

Karet alam dianggap polimer dari poliisopren



(cis-1,4 poliisopren)

(konfigurasi cis)

Di lain fihak, konfigurasi lintas, yaitu guttapercha, tak seperti karet sifatnya melainkan berupa resin kaku, karena struktur ruangnya berbeda, meskipun struktur kimianya sama. Karet alam baik dalam kekenyalam, tinggi kekuatan tariknya dan rendah titik transisi gelasnya (T_g kira-kira-78°C). yang menunjukkan kekenyalan karet yang menguntungkan pada temperatur biasa.

(1) Sifat-sifat

Warnanya agak kecoklat-coklatan, tembus cahaya atau setengah tembus cahaya, dengan berat jenis 0,91–0,93. Sifat mekaniknya tergantung pada derajat vulkanisasi, sehingga dapat dihasilkan banyak jenis sampai jenis yang kaku seperti ebonit. Temperatur penggunaan adalah sekitar 99°C paling tinggi, melunak pada 130°C dan mengurai pada kira-kira 200°C. Sifat isolasi listriknya berbeda karena perbandingan pencampuran dengan aditif, tetapi pada umumnya menguntungkan. Namun demikian, karakteristik listrik pada frekuensi tinggi, jelek. Sifat kimianya jelek terhadap ketahanan minyak dan ketahanan pelarut. Zat tersebut hampir-hampir tak tahan pelarut hidrokarbon, ester asam asetat, dsb. Karet yang kenyal agak mudah didegradasi oleh sinar UV dan ozon. Sejak digunakan selama ini, tak ada masalah dalam kemampuan cetaknya.

(2) Penggunaan

Bahan ini digunakan secara luas untuk ban mobil, pengemas karet, penutup isolasi listrik, sol sepatu dan lain-lainnya.

3.1.1 Turunan dan karet alam

(1) Ebonit

Ebonit adalah karet kaku yang dibuat dari karet alam yang ditambah dengan belerang (30–40%), kemudian dipanaskan agar terjadi ikatan silang antara molekul dengan belerang. Terbentuklah bahan seperti resin yang kaku dan hitam. Bahan ini digunakan secara luas sebagai komponen dari alat listrik atau untuk industri kimia, tetapi sekarang kebanyakan dari bahan tersebut dapat diganti oleh resin sintetik yang baru.

(2) Karet hidroklorida

Untuk membuat karet hidroklorida karet mentah diperlukan dengan asam hidroklorida. Karena tahanannya besar terhadap asam, alkali dan minyak, maka bahan ini digunakan untuk film pembungkus dengan sifat tahan air, ketahanan minyak dan ketahanan lembaban.

3.2 Karet butadien

3.2.1 Kopolimer stiren-butadien (SBR)

Ini adalah bahan kenyal yang dibuat secara kopolimerisasi butadien dan striren. Sifatnya bervariasi, bergantung pada perbandingan mol kedua bahan itu. Biasanya yang dicampur adalah 5–6 mol butadien dan 1 mol stiren. Bila stiren melebihi 50% kekenyalannya hilang dan bahan menjadi kaku. Belerang (S) digunakan sebagai zat vulkanisasi untuk membuat jaringan tiga dimensi.

(1) Sifat-sifat

Bahan tak berwarna dan tembus cahaya. Berat jenisnya 0,92. Mengenai sifat mekaniknya dapat dikatakan bahwa bahan unggul dalam ketahanan abrasi dan karakteristik pada temperatur rendah dan tinggi dibandingkan dengan karet alam. Biasanya bahan digunakan untuk daerah-30°C sampai 150°C. Ketahanan minyaknya lebih baik dari pada karet alam, tetapi bahan larut dalam hidrokarbon aromatik dan pelarut terklorinasi.

(2) Penggunaan

Bahan ini digunakan lebih banyak dari pada karet alam untuk pengemas yang tahan panas, ban mobil, ban mesin, kabel frekuensi tinggi, kabel yang tahan panas dan dingin, sol sepatu, dsb.

3.2.2 Karet nitril (Butadien akrilonitril kopolimer, BUNA N, NBR)

Butadien dan akrilonitril dikopolimerisasi menurut perbandingan yang sifatnya bervariasi. Bila akrilinitril bertambah, bahan bertambah kaku, makin tinggi kekenyalan dan kekuat an tariknya, dan makin rendah perpanjangannya.

(1) Sifat-sifat

Bahan berwarna agak kecoklat-coklatan dan transparan. Rapat massanya 0,92, dan ketahanan abrasinya baik. Bahan lebih menguntungkan pada suhu rendah, suhu kerapuhannya kirakira-30°C. Karena mempunyai gugus polar (−CN), maka zat ini larut dalam pelarut polar, tetapi tak larut dalam pelarut nonpolar dan bensin. Bahan

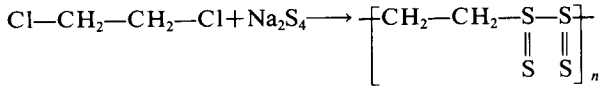
ini mempunyai sifat listrik lebih unggul daripada karet alam, tetapi tan δ lebih besar karena mengandung gugus polar.

(2) Penggunaan

Bahan ini digunakan untuk selang yang tahan minyak, ban dan sepatu. Dengan penambahan beberapa bahan penghantar listrik, dapat dibuat karet yang dapat menghantarkan listrik dan yang juga dapat digunakan untuk perekat. Pencampuran dengan resin fenol meningkatkan kekuatan impaknya.

3.3 Karet polisulfida (Tiokol)

Ini dibuat secara kondensasi polihalida dan alkali polisulfida.

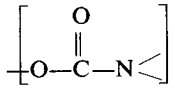


Etan diklorida Tiokol A

Bahan ini merupakan benda kenyal seperti karet, dengan masa jenis 1,5–1,6 dan agak jelek dalam kekuatan tarik dan kekenyalannya. Bersifat unggul dalam ketahanan minyak dan pelarut, dan menguntungkan dalam ketahanan terhadap cuaca dan ketahanan terhadap ozon.

3.4 Karet uretan

Benda kenyal seperti karet dibuat dari poliuretan, yang mempunyai



sebagai ikatan uretan. Poliester berantai lurus dan isosianat dengan gugus hidroksil bereaksi, atau terdapat berbagai sintesis lain. Strukturnya adalah struktur jaringan. Bahannya sangat kenyal menguntungkan sifat mekaniknya dan secara relatif unggul dalam ketahanan kimianya. Ketahanan terhadap ozon, minyak dan penuaan adalah baik. Tabel 3.38 menunjukkan sifat-sifat dari beberapa karet uretan. Keperluannya meningkat.

Tabel 3.38 Sifat-sifat elastomer uretan.

Sifat-sifat		Jenis termoset (resin coran)		Jenis termo plastik
		Dasar poliester	Dasar polieter	
Kekuatan tarik	(kgf/cm^2)	250–500	210–420	320–500
Perpanjangan	(%)	300–700	200–500	350–600
Deformasi perpanjangan permanen	(%)	5–50	0–85	15–70
Modulus	(kgf/cm^2)			
pada 100%		20–40	70–350	45–210
pada 300%		35–280	140–210	100–280
Kekerasan Shore		60A–75D	70A–75D	80A–60D
Kekuatan robek	(kgf/cm)	10–45	5–25	20–35

3.5 Karet olefin

(1) Poliisopren (Karet alam sintetik)

Isopren, adalah molekul konsisten karet alam, yang kemudian dipolimerisasi. Sifat-sifatnya sama seperti karet alam. Benda yang seragam dapat dibuat karena sifatnya tak berfluktuasi.

(2) Karet butil

Karet yang merupakan hasil kopolimerisasi isobutilen dan sedikit isoperen (1,5–5%). Karet ini dapat digunakan antara temperatur $-30°$ sampai 150°C. Karena tak mempunyai gugus polar, karakteristik frekuensi yang tinggi menguntungkan, tetapi tak demikian mengenai ketahanan minyak dan pelarut. Bahan larut dalam beberapa pelarut organik. Kemampuan terhadap cuaca menguntungkan, karena itu digunakan sebagai isolator listrik.

(3) Poliisobutilen

Ini adalah kopolimer isobutilen, yang bervariasi dari zat padat seperti karet sampai ke cairan yang sangat kental bergantung pada derajat polimerisasi. Bahan ini menguntungkan dalam karakteristik temperaturnya sehingga tahan panas atau dingin, jadi dapat digunakan untuk karet isolasi listrik, dan sebagainya.

3.6 Karet etilen propilen

Bahan ini adalah kopolimer etilen dan propilen, yang kadar etilennya 40–70% dapat digunakan sebagai karet sintetik. Tanpa adanya suatu gugus tak jenuh, ketahanan terhadap penuaan sangat baik. Bahan tak diawetkan dengan belerang seperti halnya karet biasa. Viskositas, sifat sobek dan ketahanan abrasinya agak kurang baik. Bila dien dikopolimerkan sebagai komponen ketiga, suatu hasil bermasa jenis rendah (0,86–0,89) lebih mungkin didapat. Bahan ini unggul ketahanannya terhadap: ozon, cuaca, panas, tegangan listrik dan uap dibandingkan dengan karet biasa, tetapi sifat pada pengerolan kurang menguntungkan dan daya rekat terhadap tali ban kurang baik.

Untuk karet silikon lainnya, lihat paragraf yang bersangkutan.

4 | Bahan Tambahan

Bahan tambahan digunakan untuk meningkatkan kemampuan pemrosesan atau untuk mengubah kualitas dan sifat produk dengan menambahkan bahan tersebut kepada bahan pokok yaitu polimer. Dalam melakukan pekerjaan ini perlu berhati-hati, selain memperhatikan performannya juga perlu memperhatikan segi keselamatan.

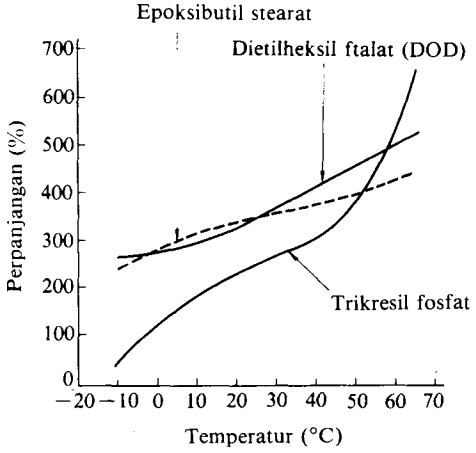
4.1 Bahan pemlastis

Pemlastis, paling sering digunakan untuk resin vinil klorida, dan dalam jumlah kecil untuk vinil asetat dan asetat.

Zat pemlastis memperbaiki kecocokannya dengan resin. Bila terdistribusi baik di antara rantai molekul dari polimer maka jarak dari molekul rantai diperbaiki dan resin lebih lunak dengan bertambahnya beban. Meski kadar zat pemlastis kecil, selain pemrosesan, akan mengubah fluiditas dan perpanjangan yang cukup berarti dan menurunkan titik transisi gelas. Tabel 3.39 menunjukkan beberapa contoh.

Zat pemlastis yang sering digunakan adalah DOP, DBP dan DOA. DOP sendiri menunjukkan pengaruh pemlastisan cukup baik. Sebagai indeks kelarutan dengan resin, dapat digunakan parameter kelarutan. Sifat-sifat yang diperlukan untuk menentukan kegunaan dari zat pemlastis adalah sebagai berikut:

1) Mempunyai daya campur lebih baik dan perembesan yang kurang, merupakan jenis nonmigrasi.
2) Agar kurang menguap, berarti tekanan uapnya rendah.
3) Agar mempunyai karakteristik termal yang menguntungkan, dan agar kurang terurai oleh panas, kurang rapuh meski pada suhu rendah, dan kurang terbakar.



Gb. 3.21 Sifat khas termal dan perpanjangan resin PVC dengan zat pemlastis (50 PHR).

Tabel 3.39 Bahan pemlastis.

Contoh	Rumus kimia	Kode	Berat jenis	Titik didih (°C, mmHg)	Titik cair (°C)	Kesesuaian dengan resin**									Karakteristik Terutama terhadap PVC
						PVC	Vinil asetat	Resin vinil butiral	Pilistriren	Metil metakrilat	Selulosa asetat	Selulosa asetat/butirat	Selulosa nitrat	Selulosa etil	
Ftalat:															
Dibutil ftalat	$C_6H_4(COOC_4H_9)_2$	DBP	1,042	227–235 (37)	−35	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Mudah sekali diplastiskan, mudah migrasi & menguap, ketahanan dinginnya jelek murah, dapat dipakai pengepak makanan.
Dioktil ftalat*	$C_6H_4(COOC_8H_{17})_2$	DOP	0,961 −0,967	231 (5)	−50	○	×	△	○	○	×	○	○	○	Pemlastis standar, pencampuran tahan dingin, sifat listrik.
Diisodesil ftalat	$C_6H_4(COOC_{10}H_{21})_2$	DIDP	—	261 (5)	−37	○	△	○	○	△	△	○	○	○	Tidak meresap, baik untuk penggunaan di luar karena tahan panas dan cuaca, antiseptik kuat.
Ditridesil ftalat	$C_6H_4(COOC_{13}H_{27})_2$	DTDP	1,111 −1,119	235 (3,5)	−30	○	△	○	○	△	△	○	○	○	Agak mudah menguap, baik dipakai untuk kabel listrik tahan panas tahan sampai 90–105°C
Butilptalil butilglikolat	$C_6H_4(COOC_4H_9)(COOCH_2COOC_4H_9)$	BPBG	1,097	219 (5)	—	○	○	○	○	○	○	○	○	○	Dipakai untuk permen karet.
Fosfat:															
Trikresil fosfat	$(CH_3C_6H_4O)_3PO$	TCP	1,145	265–285 (10)	<−35	○	○	○	○	△	○	○	○	○	Penggunaan tidak dapat menyala tahanan dingin yang buruk. Tahan air.
Trioktil fosfat*	$(C_8H_{17}O)_3PO$	TOP	0,926	220 (5)	−74	○	×	○	—	×	△	△	○	○	Tahanan dinginnya cukup, tahan air.
Asam lemak:															
Dioktil adipat*	$C_4H_8(COOC_8H_{17})_2$	DOA	0,9268	214 (5)	<−60	○	△	△	○	△	△	○	○	○	Tahan dingin.
Dioktil sebakat*	$C_8H_{16}(COOC_8H_{17})_2$	DOS	0,916	232–246 (4)	−50	○	△	△	○	○	×	△	—	○	Untuk pengemasan, tahan dingin.
Metilasetil ricinolat	$C_{17}H_{32}(OCOCH_3)COOCH_3$	MAR	0,938	185 (1)	<−30	○	○	○	△	△	△	○	○	○	Tahan dingin, kekuatan tergantung temperatur hampir serupa DOA.
Lainnya:															
Parafin diklorinasi	$C_{15}H_{26}Cl_6$		1,162 −1,175	—	—	△	○	△	○	○	△	△	△	○	Tidak dapat menyala, bahan pemlastis kedua termurah, jelek tahanan dinginnya.
Poliester	Berat mol 1.000		1,047	—	1	△	△	△	×	×	△	○	○	×	Tahan air, tahan minyak, hindari lekatan permukaan, tahanan dingin yang jelek.

* Oktil=2−etilheksil
** ○: Memuaskan, △: Baik sekali, ×: Baik

4) Agar mempunyai sifat isolasi listrik yang baik dan unggul dalam sifat dielektrik berfrekuensi tinggi.
5) Tak dapat terlarut oleh air, asam, alkali atau pelarut organik.
6) Stabil terhadap sinar UV
7) Agar tak berwarana, tak berbau dan tak beracun, ini berarti suatu keharusan untuk pemrosesan makanan.

Namun demikian agak sukar untuk memenuhi semua kondisi tersebut di atas.

Ada zat pemlastis primer dan pemlastis sekunder, yang pertama cocok dengan resin, sedangkan yang teroksidasi tidak, tetapi masih digunakan bersama-sama dengan yang pertama untuk memperbaiki sifat lain. Misalnya, parafin klorida kurang cocok dengan resin vinil klorida, tetapi dengan menggunakan DDP, yang merupakan pemlastis primer, memungkinkan bersifat tahan api. Gb. 3.21 menunjukkan ketergantungan temperatur terhadap perpanjangan resin vinil klorida yang mengandung zat pemlastis.

4.2 Bahan penyetabil

4.2.1 Bahan penyetabil panas

Polivinil klorida didehidroklorinasi menjadi struktur polien dan kehilangan warna bila dipanaskan sampai 150°C atau di atasnya atau kalau disinari UV. Untuk menghindari kehilangan warna perlu ditambahkan bahan penyetabil. Mekanisme bahan penyetabil itu adalah sebagai berikut:

1) Sebagai titik pemula dehidroklorinasi mengurangi keaktifan klor yang kurang stabil dengan cara koordinasi dan reaksi.
2) Menetralkan asam klorida yang dihasilkan oleh dehidroklorinasi dan menghilangkan warna.
3) Menguraikan peroksida. Tabel 3.40 menunjukkan beberapa contoh dari stabilisator panas.

Tabel 3.40 Penyetabil panas.

Penyetabil panas	Kestabilan panas	Sifat racun	Keterangan
Timbal stearat	Lebih baik	racun	Biasa dipakai
Timbal stearat dibasa	〃	〃	
Timbal stearat tribasa (Tribasa)	〃	〃	
Timbal karbonat	〃	〃	
Timah dilaurat dibutil	Lebih baik		Sering dipakai
Timah laurat tribensil	Terbaik		
Kadmium stearat	Lebih baik	Racun	
Kadmium laurat	〃	〃	
Seng stearat	Baik	Tidak	
Seng oktoat	Baik	Tidak	
Barium stearat	Baik	Tidak	
Barium laurat	Baik	Tidak	
Barium rikinolat	Baik	Tidak	
Strontium stearat	Baik	Racun	

4.2.2 Antioksidan

Bahan polimer dioksidasi oleh oksigen dan ozon dalam udara, yang menyebabkan berkurangnya kekuatan, pemecahan, kehilangan warna dan berkurangnya sifat isolasi listrik. Secara khusus degradasi dipercepat oleh panas sinar UV, air, dsb., selama pemrosesan. Polipropilen dan polietilen khususnya mudah teroksidasi. Resin lain yang digunakan juga tidak cukup stabil.

Antioksida bekerja sebagai berikut:

1) Untuk mengakhiri reaksi rantai radikal,
2) Untuk menguraikan peroksida, dan
3) Untuk menghilangkan logam berat.

Tabel 3.41 menunjukkan beberapa contoh.

4.2.3 Penyerap ultra lembayung (UV)

Sinar UV, yang mempunyai energi besar, memisah ikatan yang menyebabkan degradasi langsung pada bahan polimer.

Adanya oksigen mempercepat degradasi secara oksidasi. Penyerap UV menyerap energi UV dan menggunakan energi yang sama untuk perubahan dalam dari molekul penyerap agar tak diteruskan ke bahan polimernya. Tabel 3.42 menunjukkan beberapa contoh. Sementara itu, dalam bahan film yang dipakai untuk pertanian, orang harus hati-hati agar sinar UV tak terserap terlalu banyak, karena dapat mempengaruhi tanaman.

4.2.4 Pelambat api

Bahan isolasi listrik, bahan konstruksi dan komponen kereta api dalam banyak hal memerlukan sifat tak dapat terbakar. Untuk membuat bahan polimer agar tak terbakar, beberapa zat yang hampir-hampir tak terbakar, ditambahkan. Yang harus diperhatikan adalah sifat racunnya bahan-bahan. Tabel 3.43 menyatakan beberapa contoh.

4.3 Pengisi

Pengisi adalah bahan yang banyak digunakan untuk ditambahkan pada bahan polimer untuk meningkatkan sifat-sifatnya dan kemampuan pemrosesan atau untuk mengurangi ongkos.

1) Penguat: Sebagai penguat dipakai: karet dan karbon hitam maupun serat gelas dan berbagai polimer termal.
2) Perbaikan dari temperatur deformasi termal: Temperatur deformasi termal dapat dinaikkan dengan menggunakan gelas, talk atau mika.
3) Pelindung: Ketahanan permeabilitas gas, sifat isolasi listrik, dsb., diperbaiki.
4) Hantaran listrik: Hantaran listrik diberikan pada bahan polimer dengan menggunakan bubuk perak, tembaga dan logam lain atau karbon hitam.
5) Pelumasan: Dengan menambahkan molibden disulfida, grafit dsb., sifat pelumasan ditingkatkan.
6) Absorpsi: Lempung mengabsorpsi komponen elektrolitik untuk meningkatkan sifat isolasi listrik.
7) Ketahanan cuaca: Membuat perisai efektif terhadap cahaya.
8) Penyesuaian koefisien pemuaian termal: Polimer termoplastik mempunyai koefi-

Tabel 3.41 Antioksidan.

Bahan	Contoh	Nama perdagangan Nama umum	PVC	Polistiren	Polietilen	Polipropilen	Poliksimetilen	Poliester	Karakteristik
Alkil fenol	2, 6-ditributil *p*-kresol	BHT	○	○	○	○			Dipergunakan hanya untuk polistiren kekuatan impak tinggi untuk pencegah penghilangan warna dari penguraian dalam proses. Yang tidak berwarna dan tidak bernoda, kurang efektif kalau dipakai dengan karbon hitam. Untuk PVC diperlukan untuk mencegah oksidasi setelah ikatan ganda.
Akilen bisfenol	2,2′-metilen-bis (4-metil-6-*t*-butilfenol)	MDP ANTIOKSIDAN 2246				○	○		PP sangat stabil dengan tio-bis-alkilfenol, DLTDP. Tidak berwarna, tidak bernoda.
Alkil fenol	2,2-tio-bis (4-metil-6-*t*-butilfenol)				○				Menunjukkan efek sinergistik dengan karbon hitam.
β, *β*′-tiopropionik	Dilauril tio-dipropionat	TLP, DLTDP			○	○			Untuk kemasan, makanan dengan DLTDP-IONOL-asam ester fosfor organik.
Asam ester fosfor organik	Nonil fenil fosfit	TNP			○	○		○	Memperbaiki kestabilan pada cahaya.
Amin aromatik	Naftil amin	PA			○				Mudah ternoda, jarang dipakai. Jangan memakai karbon hitam.
Fenol nikel kompleks						○			Memberikan kestabilan pada cahaya dan sifat pencelupan warna.
Keterangan			Mudah dioksidasi setelah ikatan ganda	Stabil dalam oksidasi	Mudah dioksidasi	Mudah sekali dioksidasi	Mudah dioksidasi pada temp. tinggi	Mudah dioksidasi pada temp. tinggi. Lebih stabil dari poliamid	Antioksidan termasuk inhibitor untuk menghentikan pertumbuhan dari radikal yang terurai (fenol, amin) dan pengurai untuk merusak peroksida (belerang). Lebih efektif pada kombinasi penggunaan.

Catatan: Pembebanan: 0,1-1 bagian (kebanyakan 0,2–0,3 bagian)

Tabel 3.42 Penyerap UV.

Bahan	Contoh	Nama perdagangan	PVC	Polistiren	Polietilen	Polipropilen	Poliester	Karakteristik
Asam ester salisilat	Fenil salisilat	SALOL	○	○				
Benzotriazol	2 (2′ hidroksi-t-metil fenil) benzotriazol	TINUVIN P	○	○			○	Koefisien absorpsi tinggi sangat efektif
Hidroksibenzofenon	2-hidroksibenzofenon	CYASORE UV-9	○	○	○		○	Banyak dipakai untuk PVC
	2-hidroksi-4-metoksibenzofenon		○					
	2-hidroksi-4-oktoksibenzofenon		○		○	○		Dipakai untuk polipropilen dengan Ni kompleks(CYASORB UV 1084), dapat diabsorb secara luas
Keterangan			310, 322 & 364 untuk kopolimer PVC	318	318	310	325	Pada umumnya bahan dengan daerah absorpsi luas sampai mendekati UV, lebih baik. Mudah terurai, tidak cocok walaupun dapat mengabsorpsi.
			Panjang gelombang maksimum (mμ)					

Tabel 3.43 Penahan nyala.

Bahan	Contoh	PVC	Polistiren	Poliolefin	Selulosa nitrat	Resin fenol	Poliester	Resin epoksi	Poliuretan	Keterangan
Ester fosfor	Trekresil fosfat (TCP)	○		○	○		○		○	
	Tris (β-kloroetil) fosfat	○		○	○	○	○	○	○	Pemlastis kedua dari PVC efektif pada setengah dari TCP. Sering dipakai dan efektif bagi selulosa nitrat
	Tris (dikloropropil) fosfat	○		○		○	○	○	○	Sering dipakai
	Tris (dibromopropil) fosfat		○	○			○			Brom beberapa kali lebih efektif dari pada klor.
	Bromofosfonat	○	○						○	Mahal tapi sangat efektif dengan menambah 5–10% pada uretan.
Hidrokarbon halogen	Parafin diklorinasi					○			○	
	Etilene tetrabromid		○							Sangat efektif dengan menambah 3–4% pada polistiren
Anorganik	Oksida antimoni	○	○	○			○	○	○	Penggunaan kombinasi dengan halida sangat efektif memberikan oksiklorida antimoni
	Berat seng	○	○	○			○	○	○	Tidak efektif dipakai sendiri. Dipakai sebagian pengganti oksida antimoni
Senyawa reaktif	Poliol difosforkan								○	Reaktif seperti sebagian dari bahan poliuretan
	Poliol dibromkan								○	〃
	Tetrakloroftalik anhidra						○	○		Bahan baku poliester, dipakai sebagai bahan untuk mengukur resin epoksi
	Tetrabromoftalik anhidrida						○	○		〃

sien pemuaian yang lebih tinggi, yang dapat dikurangi dengan penambahan zat anorganik.

9) Perbaikan sifat pencetakan dan pelekatan: Pelekatan yang lebih baik didapat dengan penambahan beberapa pengisi anorganik.

10) Pembesaran: Harga dapat dikurangi dengan menggunakan beberapa pengisi yang murah.

Tabel 3.44 menunjukkan beberapa contoh.

4.4 Lain-lain

(1) Pewarna

Ini merupakan zat yang dapat mewarnai bahan polimer. Di samping mewarnai, zat tersebut dapat memberikan sifat ketahanan cahaya karena melindungi, memantulkan dan menyerap cahaya. Pigmen anorganik dan organik merupakan komponen utama. Zat warna mempunyai ketahanan cahaya yang jelek. Partikel dibuat sehalus mungkin, yaitu kira-kira 1μ dan dicampurkan. Tetapi bila dibuat terlalu halus, dapat menyebabkan perembesan. Setiap campuran harus diperhatikan sifat racunnya.

(2) Zat Antistatik

Pada umumnya bahan polimer mempunyai sifat isolasi listrik yang unggul, jadi pembentukan listrik statik dengan tegangan listrik tinggi mudah dihasilkan oleh gesekan atau dengan cara pemisahan film pelapis. Sebagai akibatnya, debu dapat melekat, memberikan kejutan, atau dapat menyebabkan nyala tergantung dari keadaan. Zat antistatik dipakai untuk mencegah bahaya tersebut. Ada dua jenis, yaitu jenis tercampur dan jenis pelapis, sedangkan jenis kedua ini tidak dapat bertahan untuk waktu yang lama. Tabel 3.45 menunjukkan zat antistatik yang terdapat dalam per-

Tabel 3.44 Pengisi.

Bahan	Resin										Karakteristik
	① PVC	② Poliamid	③ Polikarbonat asetal	④ Fenol	⑤ Melamin urea	⑥ Furan	⑦ Poliester	⑧ Dialil ptalat	⑨ Resin Epoksi	⑩ Silikon	
Bubuk:											
Silika	○						○	○	○	○	—Untuk mencegah jatuhan & aliran, Dipakai pada ①, ⑦ dan ⑧ ⑨ memperbaiki sifat kimia, ketahanan panas dan isolasi listrik ⑩ Penguatan
Mika				○			○	○	○		—Memperbaiki isolasi listrik, ④ sering digabung dengan asbes sebagai penguat ⑦, ⑧ memperbaiki tahanan panas.
Talk							○		○		—⑦ Diperoleh bahan kental putih tidak lengket di tangan. Abrasi lebih mudah, mencegah jatuhan secara efektif. ⑨ Dapat diperbesar.
Tanah diatom						○					—⑥ Memperbaiki ketahanan zat kimia.
Tanah liat	○						○	○	○		—⑦ Dipakai untuk kabel listrik. ⑦, ⑧ Memperbaiki ketahanan kimia dan mencegah aliran. ⑨ Dapat diperbesar.
Grafit		○							○		—② Memperbaiki tahanan aus.
Karbon hitam	○	○				○					—Pewarna, lebih efektif bagi sifat tahan cuaca. ① Memberikan hantaran listrik. Perak dapat pula ditambahkan untuk memberikan hantaran listrik lebih baik. ⑩ Memperkuat dan memberi hantaran listrik. Sukar dicampur kecuali vinil, silikon.
Kalsium karbonat	○						○	○	○	○	—Untuk memperbesar, pewarna. ① banyak dipakai. ⑦, ⑧ Kurang meningkatkan viskositas, penambahan masif mungkin. Memperbaiki tahan panas & tahan abrasi. ⑩ Memperbaiki ketahanan panas.
Titanium dioksid	○									○	—① Untuk memperbesar, dan sebagai pewarna.
Alumina									○		—Memberikan hantaran panas lebih baik.
Bubuk aluminium							○	○	○		—Memberikan hantaran panas lebih baik. ⑦ Tahan panas, ⑨ Memperbaiki sifat mekanik.
Bubuk besi									○		—⑨ Memperbaiki kekuatan mekanik, hantaran panas. Dipakai untuk perkakas.
Molibden disulfid		○									—② Memperbaiki tahanan abrasi, kestabilan dimensi.
Barium sulfat							○				—⑦, ⑧ Kurang viskus penambahan masif dimungkinkan. Memperbaiki ketahanan: panas, abrasi dan kimia.
Poliali-urea										○	—⑩ Memperbaiki ketahanan panas. Mempertinggi viskositas minyak.
Tembaga ftalosianin										○	—⑩ Memperbaiki ketahanan panas. Dipakai sebagai penutup karet silikon. Dapat dipakai pada temperatur tinggi.
Sabun litium										○	—⑩ Memperbaiki ketahanan panas. Mempertinggi viskositas minyak.
Bubuk kayu-selulosa (pohon: cemara, poplar, momi fir, acer, nara ek, birch kuning dst dipakai kira-kira 80 mesh)	○			○	○						—① Memperbaiki elastisitas lantai. ④ 70% bahan cetakan diisi bubuk kayu. Memperbaiki: mampu cetak, kekuatan tekan & menekan biaya. ⑤ Mudah dicampur, ketahanan: panas dan air kurang juga koefisien penyusutannya dibanding selulosa. ⑥ Tidak dipakai. Dirusak oleh asam pengeras.
Serat:											
Asbes } Bergantian	○			○	○	○	○	○	○		—Memperbaiki ketahanan: panas dan kimia. ⑤ Memperbaiki koefisien penyusutan. Masa jenis tinggi, mampu cetak yang jelek. ⑦, ⑧ Memperbaiki mampu cetak adukan mula.
Serat gelas } Bergantian	○						○	○	○		—① Mengurangi pepanjangan bagi jenis lunak. Dapat diperkuat. ⑦, ⑨ Untuk penggulung serabut, didapat kekuatan tinggi. ⑧ Untuk adukan mula.

Tabel 3.45 Bahan anti statik.

Seri	Jenis	Contoh dan rumus struktur*	Polietilen	Polipropilen	PVC	Polistiren	Resin AS	Resin ABS	Keterangan
Anion	Alkil sulfat Alkil alil sulfat Alkil fosfat Alkil amin sulfat	$R_{12}O(C_2H_4O)_n—SO_3N(—C_2H_4OH)_3$ $R_{16}OSO_3NHC(=NH)—NHCONH_2$ R_9-C$_6$H$_4$-$O(C_2H_4O)_n—SO_3N(—C_2H_4OH)_2$ $(RO)_2P(=O)O(C_2H_4O)_n—N(—C_2H_4OH)_2$ $R_{16}NHC_2H_4OSO_3N(C_2H_4OH)_3$ $R_{12}CONHC_2H_4OSO_3Na$			○	○			
Kation	Garam amonium kuarterner Resin amonium kuarterner	$[R_{17}CONCH_3H_6(CH_3)_2C_2H_4OH]⊕X⊖$ X: NO_3, ClO_4 $—CH_2—CH—$ $COHN-R-N(XY)=(CH_3)_2$	○	○	○	○	○		Seri kation sering dipakai sangat efektif. Tapi dalam hal PVC tidak begitu banyak dipakai kecuali untuk piringan hitam, karena resin cepat terurai & berubah warna.
Nonion	Sorbitan Eter Amin & Amid Etanolamid	Polioksitilen sorbitan monostearat Polioksietilen alkil dan alil eter Polioksitilen alkil amin dan amid $R_{17}CONH(C_2H_4O)_2H$	○	○	○	○			Jenis sorbitan dan eter tidak berubah warna, tetapi jumlahnya banyak karena kurang efektif.
Amfoter	Betaine	$R_{16}—N⊕(CH_3)_2CH_2COO⊖$, $R_{12}—N⊕[-(CH_2CH_2O)_nH]_2CH_2CH_2PO_3⊖⊖NA⊕$	○	○		○		○	

* R Menyatakan gugus hidrokarbon alifatik, yaitu, R_{12} berarti gugus hidrokarbon alifatik dengan 12 karbon. Banyak dari bahan tersebut dijual dinyatakan serinya, tetapi tanpa rumus kimia. Sebanyak 0,2-2 bagian perlu ditambahkan, tetapi masih belum diperoleh zat antistatik untuk plastik kaku yang berpengaruh langsung dan efektif.

dagangan. Zat-zat tersebut harus memenuhi kondisi berikut ini:

1) Agar efektif, dicampurkan sedikit zat antistatik yang kurang dari 2 PHR.
2) Agar tidak terlalu merusak sifat resin.
3) Agar dengan sendirinya stabil secara termal dan tak mempercepat penguraian resin.
4) Agar tak beracun.
5) Agar mengurangi harga.

5 RESIN TERMOSET

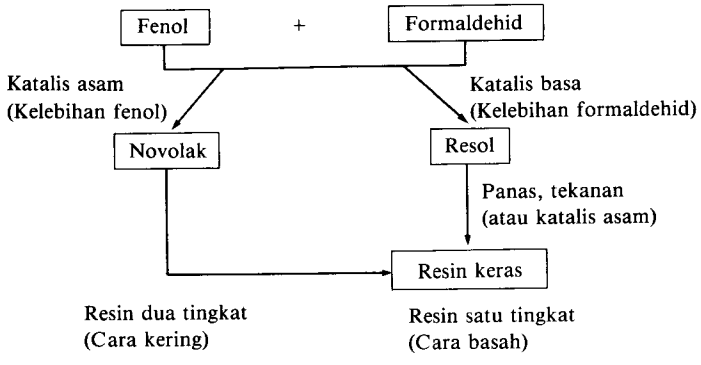
Ada resin fenol, resin urea dan resin melamin yang dihasilkan dari kondensasi formalin pada pemanasan dan resin epoksi dihasilkan dari polimerisasi adisi pada pemanasan dengan adanya katalis amino. Dalam setiap hal resin yang dipanas awetkan mempunyai ikatan dengan struktur jaringan, sukar larut dalam pelarut dan tak dapat dilelehkan oleh panas. Bahan ini terutama digunakan untuk bahan-bahan teknik seperti komponen listrik dan mekanik, pelapis hiasan, dsb.

5.1 Resin fenol

Fenol-fenol seperti fenol, kresol, ksilenol, dsb., dikondensasikan dengan formadehida untuk menghasilkan resin termoset. Seperti yang ditunjukkan pada Gb. 3.22 bila suatu asam digunakan sebagai katalis pada reaksi fenol dan formaldehida, akan dihasilkan suatu novolak termoplastik yang larut dalam alkohol dan aseton. Bahan ini direaksikan dengan pengeras, heksametilentetramin, untuk membuat resin yang tak larut dan tak dapat dilelehkan. Ini disebut cara kering atau proses dua tahap. Di lain fihak dengan katalis basa dihasilkan suatu bahan seperti sirop yang disebut resol, yang tergolong resin yang tak larut dan tak dapat dilelehkan. Ini disebut cara basah atau proses satu tahap.

(1) Pencetakan

Di bawah ini diberikan contoh proses dua tahap. Novolak dicampur dengan heksametilentetramin 10–15%, terhadap 50 bagian campuran ini ditambahkan 50 bagian bubuk kayu, 0,5–1,2 bagian magnesia dan pelarut maupun zat pewarna, dicampur dengan baik dan dirol panas pada 120–130°C kemudian dihancurkan untuk membuat bubuk cetakan. Rol yang dipanaskan sebagian besar akan memberikan pengaruh pada sifat-sifat produknya. Di lain pihak, resol digunakan dalam bentuk larutan alkohol 30–50% (pernis), sedangkan untuk barang cetakan, bubuk kayu secukupnya dijenuhkan dalam pernis (kira-kira 50%), dikeringkan dan dibubukkan, untuk



Gb. 3.22 Reaksi resin fenol.

digunakan sebagai bahan mentah. Diperlukan waktu dan energi untuk pengeringan, karena itu dalam kebanyakan hal, ini dilakukan menurut proses dua tahap.

(2) Sifat-sifat

Sifat produk akhir berbeda terutama karena rumusan bahan mentahnya, jenis dan banyaknya katalis, pengisi, dan pemilihan medium dalam hal resin fenol.

Keuntungannya adalah sebagai berikut:

1) Mudah dibentuk, dan menguntungkan dalam kestabilan dimensi. Kurang penyusutannya dan kurang keretakannya.
2) Unggul dalam sifat isolasi listrik.
3) Relatif tahan panas dan dapat padam sendiri.
4) Unggul dalam ketahanan asam.

Kerugiannya adalah sebagai berikut:

1) Kurang tahan terhadap alkali.
2) Aslinya agak berwarna, jadi tak bebas dalam pewarnaan.
3) Jelek ketahanan busur listriknya.

(3) Penggunaan

Bentuk yang cukup rumit dapat dicetak. Digunakan untuk komponen dalam bidang listrik dan komunikasi. Tabel 3.46 menunjukkan jenis, karakteristik dan penggunaan.

Tabel 3.46 Jenis, karakteristik dan penggunaan bahan cetakan resin fenol.

Jenis	Dasar	Karakteristik	Penggunaan
Umum	Bubuk kayu atau bubuk tanaman	Murah, isolasi listrik yang baik.	Alat listrik secara umum soket dst.
Isolasi listrik	〃	Sifat listrik dan tahan air sangat baik juga sifat mekanisnya.	Komponen yang isolasi listriknya diperlukan, untuk alat komunikasi, otomotif dan mesin lainnya.
Isolasi frekuensi tinggi	Anorganik	Sifat listrik yang sangat baik terutama untuk frekuensi tinggi.	Komponen untuk alat komunikasi tanpa kabel, jaringan listrik frekuensi tinggi
Mesin-mesin listrik	Bubuk kertas dan bahan berserat lainnya.	Sifat listrik dan mekaniknya baik, terutama kekuatan impaknya.	Komponen mesin-mesin listrik (kotak, tutup dan komponen lainnya untuk operasi mekanik).
Tahan panas	Asbes dan bahan anorganik lainnya.	Tahan panas, baik untuk penggunaan komponen tahan bakar dan tahan busur listrik.	Komponen untuk kapal laut dan kereta api dan peralatan listrik berat.
Mekanik	Potongan kain dan bahan berserat lainnya.	Sifat mekaniknya yang baik, terutama ketahanan impaknya.	Komponen untuk alat transportasi, mesin pintal dan mesin pertanian.
Tahan asam	Bubuk kayu, potongan kain dan bahan berserat lainnya	Tahanan asamnya baik dan mempunyai sifat mekanik yang baik.	Komponen untuk peralatan pembuat serat buatan, untuk industri kimia dan mesin pertanian.

5.2 Resin urea-formaldehid (Resin urea)

Ini adalah resin termoset yang didapat lewat reaksi urea dan formalin, di mana

urea dan formaldehid (37% formalin) bereaksi dalam alkali netral dan lunak. Untuk resin cetakan, ditambah 97–160 g formalin 37% (1,2–2,0 mol sebagai formaldehid pada 60 g (1 mol) urea), dan pH diatur sampai 7–8,5 dengan air amonia, larutan natrium hidroksida dalam air, trietanolamin, dsb., dan biarkan bereaksi berturut-turut untuk 2–3 jam pada 40°C atau 1,0–1,5 jam pada 70°C. Larutkan kondensat awal yang didapat dalam heksametilentetramin 1–8% (heksamin), dan tambahkan 29–48 g pulp/bubur selulosa (α-selulosa) dan campurkan secukupnya untuk kira-kira 1 jam. Makin sedikit pulp yang terdapat sebagai pengisi, semakin transparan produk yang didapat, tetapi berkurang kekuatannya, menyusut lebih banyak dan lebih mudah retak. Resin campuran ini dikeringkan untuk 2–3 jam mulai 60°C sampai 90–95°C, didehidrasi dan dikondensasi. Bahan yang kering kemudian dibubukkan untuk 20–48 jam, lalu ditambahkan bahan pewarna, pemlastis, pengeras (asam oksalat, asam ftalat, amonium ftalat dan garam-garam lain). Di samping itu, bahan digunakan sebagai perekat, cat, pengubah kertas dan serat (formalin sisa dilarang menurut hukum).

Resin urea sendiri lebih jelek dari pada resin fenol, resin melamin, dsb., dalam hal ketahanan air, kestabilan dimensi dan ketahanan terhadap penuaan, karena itu, beberapa bahan lain ditambahkan, atau diproses menjadi kopolimer dengan fenol, melamin, dsb., untuk memperbaiki sifat-sifat tersebut di atas.

(1) Pencetakan

Proses yang dipakai yaitu pencetakan tekan, pengalihan dan injeksi. Dalam pencetakan tekan, bahan diproses pada temperatur cetakan 130–150°C, tekanan 150–300 kg/cm^2, selama 30–40 detik per 1 mm ketebalan dari benda cetakan.

(2) Penggunaan

Bila benda cetakan kaku, tahan terhadap pelarut dan busur listrik, jernih dan dapat diwarnai secara bebas, maka bahan ini banyak digunakan untuk barang-barang kecil yang diperlukan sehari-hari seperti pelindung cahaya, soket, alat-alat listrik, kancing, tutup wadah, kotak, baki dan mangkuk. Beberapa permasalahan yang masih ada, yaitu ketahanan air dan ketahanan terhadap penuaan. Permintaan belum meningkat.

5.3 Resin melamin

Bahan ini lebih unggul dalam berbagai sifat dari pada resin urea.

(1) Cara produksi

Karena melamin mempunyai 3 gugus amino, maka 6 mol formaldehid dapat bereaksi dengan 1 mol melamin, tetapi pada umumnya 3–5 mol formaldehid digunakan untuk membuat resin. Bahan bereaksi secara termal dengan katalis. Untuk membuat bahan cetakan, 6 g (1 mol) melamin direaksikan dengan 243 g formalin 37% (3 mol sebagai formaldehid) diatur sampai pH 8–9 dengan larutan natrium karbonat dalam air. Setelah 60–90 menit bahan dipindahkan ke alat penekan, dicampur dengan 55–85 g pulp untuk sekitar 1 jam, dikeringkan 80–110°C dan dibubukkan. Pembubukan dihentikan setelah 10–15 jam. Karena bahan cetakan mengandung 60–70% resin, ditambahkan pulp 30–40%, pengeras 0,05–1% (bahan asam lemah seperti ftalat anhidrid atau garamnya) dan 0,5–2% bahan pewarna. Berbagai bahan dapat dibuat dengan kondensasi yang sesuai untuk memenuhi kegunaan yang bersangkutan, seperti perekat, lapisan hiasan, lembaran yang dilaminasi, cat, kertas dan serat.

(2) Pencetakan

Seperti halnya resin urea, dilakukan pencetakan: tekanan, pengalihan, dan injeksi. Suhu pencetakan 10–20°C lebih tinggi dari pada resin urea. Sebagai kondisi pencetakan standar, digunakan temperatur pencetakan 150–170°C, tekanan pencetakan 150–250 kgf/cm^2, waktu pencetakan 1 menit pada 160°C atau 40 detik pada 170°C per 1 mm tebal bahan. Dalam produksi alat-alat makan, pengerjaan yang kurang sesuai menghasilkan formalin sisa yang mengganggu dan merusak kemampuan penggunaan, karena itu pada umumnya barang cetakan dibiarkan dalam termostat pada 80–120°C selama 30–60 menit agar pemantapan dapat berlangsung secukupnya (pemanggangan akhir). Proses yang cocok digunakan untuk pencetakan pelapis hiasan dan lembaran-lembaran yang dilapisi, perekat, pengecatan, pelapisan resin pada serat dan kertas, dsb. untuk memenuhi berbagai keperluan.

(3) Penggunaan

Barang-barang cetakan dari resin melamin dapat diwarnai secara bebas. Karena unggul dalam ketahanan air (khususnya tahan terhadap air mendidih), ketahanan panas, ketahanan terhadap isolasi listrik, ketahanan busur listrik, bahan ini kegunaannya luas. Penggunaan utama adalah untuk: alat-alat makan, bagian-bagian komponen listrik dan mekanik. Bahan ini khususnya sangat cocok untuk alat-alat makan, meskipun tidak cukup anti penodaan (mudah dinodai oleh kopi, lipstik, dsb.)

Untuk pelapis hiasan didapatkan hasil yang baik dalam warna, kilap dan disain. Penerapannya luas karena unggul dalam ketahanan abrasi, ketahanan bakar, ketahanan pelarut, ketahanan kimia, dsb. Lembaran pelapis banyak digunakan sebagai komponen teknik. Sebagai perekat banyak digunakan untuk kayu lapis, pengerjaan kayu, dsb., karena kelekatannya sangat tahan air dan tahan terhadap proses penuaan. Karena mudah menyebabkan keretakan pada pelapisan dan kelekatannya terhadap logam tak selalu menguntungkan, maka bahan dicampur sehingga menjadi resin alkid, resin akrilik, resin epoksi atau dimodifikasi dengannya bila digunakan sebagai bahan cat. Bahan tersebut terutama digunakan sebagai cat bakar untuk mobil, komponen listrik dan komponen kereta api.

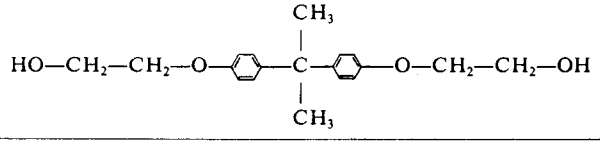
5.4 Resin poliester tak jenuh

Dalam kebanyakan hal ini disebut poliester saja. Karena berupa resin cair dengan viskositas yang relatif rendah, mengeras pada suhu kamar dengan penggunaan katalis tanpa menghasilkan gas sewaktu pengesetan seperti banyak resin termoset lainnya, maka tak perlu diberi tekanan untuk pencetakan. Berdasarkan karakteristik ini, bahan dikembangkan secara luas sebagai plastik penguat serat (FRP) dengan menggunakan serat gelas.

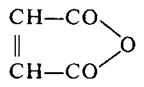
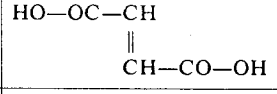
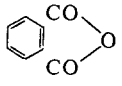
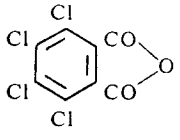
(1) Produksi

Seperti dinyatakan pada Tabel 3.47, suatu asam dibasa (B) bereaksi secara kondensasi dengan alkohol dihidrat (A) untuk mendapatkan poliester. Karena asam tak jenuh digunakan dengan berbagai cara sebagai bagian dari asam dibasa, yang menyebabkan terdapatnya ikatan tak jenuh dalam rantai utama dari polimer yang dihasilkan, maka disebut poliester tak jenuh. Kemudian, monomer vinil seperti yang ditunjukkan pada Tabel 3.48 dicampur, yang bereaksi dengan gugus tak jenuh pada saat pencetakan untuk mengeset. Sebagai contoh standar digunakan 1 mol (98 g) anhidrida maleat, 1 mol (148 g) anhidrid ftalat, 1 mol (62 g) etilen glikol dan 1 mol

Tabel 3.47(A) Alkohol dihidrat dipakai untuk resin poliester.

Nama	Rumus struktur	Karakteristik
Etilen glikol	$HO—CH_2—CH_2—OH$	Standar
Propilen glikol	$HO—CH(CH_3)—CH_2—OH$	Penggunaan yang tepat, diperbaiki dengan stiren
1,3-Butilen glikol	$HO—CH(CH_3)—CH_2—CH_2—OH$	Fleksibilitas diperbaiki
Dietilen glikol	$HO—CH_2—CH_2—O—CH_2—CH_2—OH$	Fleksibilitas diperbaiki
Bisfenol dioksietileter		Ketahanan air dan bahan kimia diperbaiki

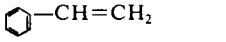
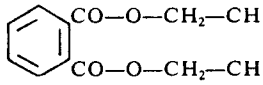
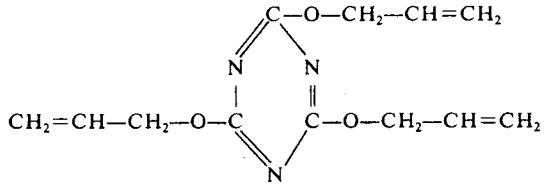
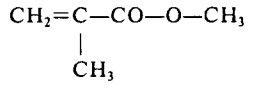
Tabel 3.47(B) Asam dibasa dipergunakan untuk resin poliester.

Nama	Rumus struktur	Karakteristik
Asam tak jenuh:		
Anhidrida maleat		Menjadi asam fumarat, tersusun kembali karena kondensasi.
Asam fumarat		Sangat kuat
Asam jenuh:		
Asam adipat	$HO—OC—(CH_2)_4—CO—OH$	Sangat fleksibel
Anhidrid ftalat		Standar
Asam isoftalat		Baik kekuatannya, tahan air dan tahan zat kimia
Anhidrid tetrakloroftalat		Tahan api

(76 g) propilen glikol. Sebagai monomer pengikat silang untuk poliester, stiren bersifat unggul dalam keaktifannya dan lebih murah.

Untuk pengesetan termal, digunakan benzoil peroksida (BPO) sebagai katalis. Temperatur optimal adalah 80-130°C, namun demikian, kebanyakan pengesetan dingin yang digunakan. Sebagai katalis digunakan metil etil keton periksida (MEKPO) dan sebagai pemercepat digunakan kobal naftenat. Bahan ini baik digunakan bila diencerkan 10 kali dengan monomer stiren. Katalis ditambahkan pada 1-2%. Suatu zat pengental dan zat anti pengerutan digunakan juga.

Tabel 3.48 Monomer vinil dipergunakan untuk resin poliester.

Nama	Rumus struktur	Karakteristik
Stiren		Standar
Dialil ftalat		Tidak menguap, tahan impak
Trialil ftalat		Tahan panas
Metil metakrilat		Tahan cuaca

(2) Sifat-sifat

Ada banyak jenis poliester. Bila zat tersebut juga dimodifikasi menurut suatu cara, sifat-sifatnya cukup bervariasi. Mengenai kekuatannya dibahas dalam bentuk komposit karena digunakan bersama-sama dengan serat gelas. Resinnya sendiri kaku dan rapuh.

Mengenai sifat termalnya, karena banyak mengandung monomer stiren, maka suhu deformasi termal lebih rendah dari pada resin termoset lainnya dan ketahanan panas jangka panjangnya adalah kira-kira 110–140°C. Ketahanan dingin adalah baik secara relatif. Sifat listriknya lebih baik di antara resin termoset, tetapi diperlukan penghilangan lembaban yang cukup pada saat pencampuran dengan gelas.

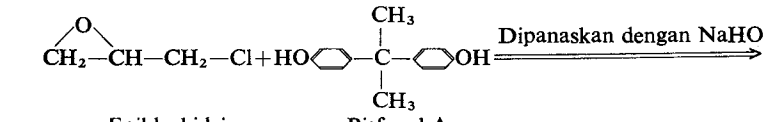
Mengenai ketahanan kimianya, pada umumnya kuat terhadap asam kecuali asam pengoksid, tetapi lemah terhadap alkali. Bila dimasukkan dalam air mendidih untuk waktu yang lama (300 jam), bahan akan pecah dan retak-retak. Bahan ini mudah mengembang dalam pelarut, yang melarutkan polimer stiren. Kemampuan terhadap cuaca sangat baik. Tahan terhadap kelembaban dan sinar U. V bila dibiarkan di luar, tetapi sifat tembus cahaya permukaan rusak dalam beberapa tahun. Secara luas digunakan untuk konstruksi sebagai bahan komposit, khususnya dengan serat gelas.

5.5 Resin epoksi

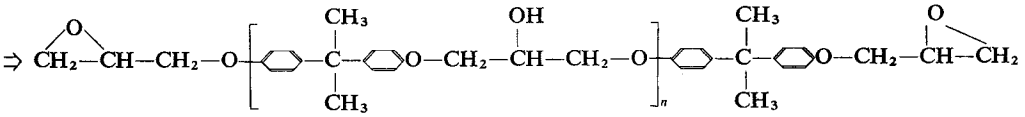
Resin ini mempunyai kegunaan yang luas dalam industri teknik kimia, listrik, mekanik dan sipil sebagai perekat, cat pelapis, pencetakan cor dan benda-benda cetakan.

(1) Produksi

Pada saat ini produknya adalah kebanyakan merupakan kondensat dari bisfenol A (4-4′ dihidroksidifenil 2,2-propanon) dan epiklorhidrin.



Epiklorhidrin Bisfenol A



Resin Epoksi ($n = 0-12$)

Bisfenol A diganti dengan novolak, atau senyawa tak jenuh, siklopentadien, dsb. Resin epoksi bereaksi dengan pengeras dan menjadi unggul dalam kekuatan mekanik dan ketahanan kimia. Sifatnya bervariasi bergantung pada jenis, kondisi dan pencampuran dengan pengerasnya. Banyaknya campuran dihitung dari ekivalen epoksi (banyaknya resin yang mengandung 1 mol gugus epoksi dalam gram). Tabel 3.49 menunjukkan beberapa contoh dan kondisi demikian.

(a) Zat pengawet amin

Poliamin alifatik, misalnya dietilentriamin, trietilentetramin, dsb., digunakan sebagai zat pengawet dingin, tetapi zat-zat tersebut beracun. Dalam banyak hal senyawa lain, seperti akrilonitril, etilen oksida, dsb., ditambahkan, dan digunakan sebagai senyawa tambahan yang mempunyai gugus amin pada ujung.

(b) Pengeras anhidrida asam

Anhidrida ftalat, anhidrida tetra dan heksahidroftalat, dsb., digunakan.

(2) Sifat-sifat

(a) Resin bisfenol A

Kelekatannya terhadap bahan lain baik sekali. Bahan ini banyak digunakan dalam cat untuk logam, perekat, pelapis dengan serat gelas, dsb. Pada pengawetan tak dihasilkan produk tambahan seperti air, dan penyusutan volume kurang. Kestabilan dimensinya baik. Sangat tahan terhadap zat kimia dan stabil terhadap banyak asam kecuali asam pengoksid yang kuat, dan asam alifatik rendah, alkali dan garam. Karena tak diserang oleh hampir semua pelarut, bahan ini baik digunakan sebagai bahan yang non-korosif.

(b) Resin sikloalifatik

Bahan ini viskositasnya rendah dan ekivalensi epoksinya kecil. Bahan berguna sebagai pengencer bisfenol karena mudah penangannya. Karena kaku dan rapuh, bahan terutama digunakan untuk alat isolasi listrik yang diperkuat dengan serat gelas. Ketahanan busur dan sifat anti alurnya baik.

(3) Pencetakan

(a) Pengecoran

Digunakan untuk produksi perkakas dan pembenam komponen listrik.

(b) Pencetakan lapisan

Digunakan untuk produksi pelapis resin epoksi-serat gelas. Ada metoda laminasi basah (pengeras diletakkan dalam resin cair dan ditambah pengencer atau pembasah, viskositasnya turun), metoda laminasi kering (Resin padat dilarutkan dalam pelarut seperti aseton, dan pengeras yang tak bereaksi pada suhu rendah, ditambahkan kemudian, dalam masa serat gelas dijenuhkan dan dikeringkan), dan metoda penggulungan filamen (Serat gelas yang jenuh digulung pada inti dan diawetkan dengan pemanasan.

Tabel 3.49 Sifat-sifat bahan pengeras dan resin epoksi kaku.

Pengeras	Beban perjam*	Umur (jam)	Pengeras		Penggunaan				Sifat-sifat resin kaku		Keterangan
			Temperatur (°C)	Waktu (jam)	Penempelan	Pelapisan	Pengecoran	Pengecatan	Temperatur deformasi panas (°C)	Karakteristik	
Dietilen triamin	8	0,3	ord.–115	100–0,5	○	○	○	○	120	Sedikit kurang, dalam sifat listriknya. Agak getas.	Sangat reaktif dan higroskopik. Sukar diproses bersifat racun.
Trietilen triamin	9	0,5	ord.–100	100–0,5	○	○	○	○	120	Sama dengan di atas.	Sama dengan di atas. Kurang bersifat racun.
Dietilaminopropilamin	4–8	1–4	65–115	4–1	○	○	○		85	Sifat listriknya baik pada temperatur kamar. Ketahanan dingin yang baik.	Agak lemah dalam reaksi, mudah diolah.
m-Fenilen diamin	14–16	1–3	130–150	3–1	○	○	○		150	Tahanan panas yang baik Baik sifat listrik dan mekaniknya pada temperatur tinggi	Cenderung menjadi hitam setelah dikeraskan
Diaminodifenilsulfon	30–35	1–3	110–200	4–2	○	○	○		175	Sama dengan di atas	Dikur agak lambat
Disiandiamid	4–8	700	160	0,5		○			—	Sifat listriknya baik Cukup sifat mekaniknya pada 100°C atau lebih	Hanya dipakai untuk pelapisan kering (Pengeras laten)
BF_3-Monoetilamin	2–5	>700	110–200	3–1	○	○	○		170	Baik sifat panas dan sifat ketahanan zat kimianya.	Pengeras laten
Poliamid	60–120	2–4	60–150	3–0,5	○	○	○	○	—	Cukup baik sifat listriknya.	Sifat mekaniknya dapat berubah setelah pengerasan oleh perbandingan campuran poliamid
Anhidria ftalat	35–50	6	150	8		○	○		140	Baik sifat listriknya	Murah, terjadi sublimasi

* Dalam bagian terhadap 100 bagian resin (ekivalen dengan 180 dari resin epoksi)

(4) Penggunaan

(a) Perekat

Hampir semua plastik dapat melekat cukup kuat kecuali resin silikon, fluoresin, polietilen dan polipropilen. Jenis yang lain adalah jenis yang paling sering dipakai. Paling luas digunakan dalam industri penerbangan, konstruksi dan listrik.

(b) Cat

Bahan cat dapat dipakai terhadap berbagai bahan, dan secara luas digunakan karena pelapisannya kuat, unggul dalam ketahanan air dan ketahanan kimia.

(c) Pencetakan coran

Kebanyakan digunakan dalam industri listrik

5.6 Resin poliuretan

Poliuretan terutama dihasilkan oleh reaksi diisosianat dan senyawa polihidroksi (disebut poliol, karena mempunyai lebih dari dua gugus-OH akhir). Resin ini kuat, baik dalam ketahanan abrasi, ketahanan minyak dan ketahanan pelarut, maka digunakan untuk plastik busa, bahan elastis, cat, perekat, serat elastis, kulit sintetik, dsb. Bahan mentah bermacam-macam dan karakteristik resinnyapun bervariasi secara luas, jadi bahan mentah yang memenuhi kegunaannya harus dipilih.

(1) Sifat-sifat

Seperti diuraikan di atas, poliuretan dengan berbagai sifat dapat dibuat, bergantung pada bahan mentah yang dipilih, tetapi mengenai sifat-sifat yang umum, baik dalam elastisitas dan kekuatan, kekuatan tariknya tinggi, unggul dalam ketahanan terhadap abrasi, penuaan, minyak, pelarut, dan sifat temperatur rendahnya yang menguntungkan namun demikian, mudah dihidrolisa, relatif kurang kuat terhadap asam dan alkali, dan warnanya mudah luntur oleh panas atau cahaya.

(2) Penggunaan

Bahan ini digunakan secara luas untuk kulit sintetik, serat, bahan karet, bahan busa dan perekat.

5.7 Lain-lain

(1) Resin silikon

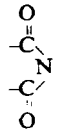
Bahan ini digunakan dalam bentuk pernis sebagai larutan dalam pelarut organik, dan ditermoset setelah perlakuan dan pencetakan. Resin set dinginpun dapat diperoleh. Bahan ini unggul dalam sifat isolasi listrik, dan sifat penggunaan bertahan pada 200°C., Bahan juga tahan terhadap zat kimia, tetapi agak mengembang dalam pelarut organik.

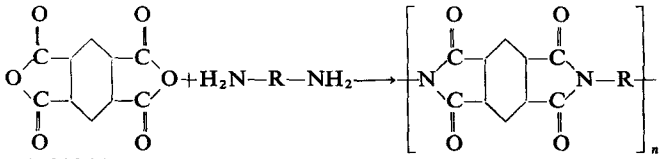
6 BAHAN POLIMER YANG TAHAN PANAS

Bahan polimer tahan panas sangat cepat berkembang dalam tahun-tahun terakhir, tetapi jenis yang diproduksi secara besar-besaran dalam praktek sebagai material industri relatif kurang. Ada poliimid, poliimid amid, polidifenileter, dsb.

6.1 Poliimid

Ini adalah resin yang tahan panas yang dikembangkan oleh Du Pont, yaitu suatu polimer berantai lurus dengan struktur imid asam:





6.1.1 Email pyle ML

Poliamin dibuat dari diamin aromatik dan diamin hidrid aromatik dilarutkan dalam pelarut, yang dipolimerisasi kondensasi menjadi poliimid secara pembakaran.

(1) Sifat-sifat

Diharapkan perubahan dalam sifat mekanik berkurang untuk temperatur dari −190°C sampai 220°C. Khususnya pada temperatur serendah-190°C, reduksi dalam modulus tekuk hanya sekitar 50%. Sifat isolasi listrik temperatur tinggi, juga baik. Pada 400°C berat berkurang, tetapi sampai 800°C tak hangus. Bahan sangat tahan terhadap minyak dan sangat tahan terhadap gas freon, namun demikian, pada temperatur tinggi bahan kurang tahan terhadap alkali dan mudah terdegradasi.

(2) Penggunaan

Bahan digunakan untuk pelapisan email dari kawat, cat yang tahan minyak pada temperatur rendah dan tinggi.

6.1.2 Film poliamid (Kapton)

Film ini mempunyai ketahanan panas yang tinggi dan sifat isolasi listrik. Sifat mekanik tak bervariasi banyak dari 195°C sampai 200°C, namun demikian, dalam air mendidih sifat listrik dan mekanik agak banyak berkurang. Bahan cukup tahan terhadap iradiasi. Pada sekitar 400°C beratnya agak berkurang, tetapi tak berubah warna sampai 800°C. Bahan ini digunakan untuk film isolasi listrik yang tahan panas, film isolasi untuk motor, dan sebagainya.

6.1.3 Bahan cetakan (Vespel)

Bahan cetakan poliimid digunakan untuk bahan yang tahan panas dari komponen mesin listrik dan mesin presisi yang memerlukan gesekan rendah. Sifat mekanik dan listrik yang stabil dalam daerah yang luas (−195 ~ 200°C), dan masih dapat digunakan sampai 260°C. Untuk waktu yang pendek tahan sampai 400°C. Dalam gas tak aktif, bahan ini dapat digunakan sampai 316°C. Koefisien gesekannya rendah sehingga memungkinkan dipakai sebagai bahan bantalan. Bahan tak diserang oleh pelarut organik biasa, cukup tahan terhadap asam tetapi kurang tahan terhadap alkali. Dalam air dapat terjadi perubahan dimensi akibat absorpsi air. Kemampuan pencetakan tak selalu baik. Dapat dicetak tekan, tetapi waktu set diperlukan 48 jam.

Blok cetakannya diproses secara mekanik untuk membuat benda-benda. Karena tahan terhadap iradiasi, maka bahan dipakai untuk alat-alat radiasi yang digunakan pada temperatur tinggi, komponen listrik yang tahan panas, roda gigi, bantalan, bahan yang tahan terhadap gas freon, komponen reaktor atom, dan sebagainya.

6.2 Lain-lain

(1) Polibenzimidazol

Ini adalah resin poliimid dengan ketahanan panas dan dingin yang kuat, jadi dalam daerah −255°C ~ 265°C diharapkan perubahan kecil dalam sifat listrik dan mekanik. Bahan digunakan untuk penutup tahan panas, cat tahan panas dan bahan plastik busa.

(2) Amid poliimid

Ini adalah suatu polimer yang terdiri dari struktur poliimid berikatan kovalen dengan amid. Bahan mempunyai sifat isolasi listrik dan sifat mekanik yang baik untuk daerah temperatur yang luas. Namun demikian karena adanya ikatan amid, ketahanan terhadap panas lebih rendah dari pada poliimid, sampai 180°C diharapkan menurunnya sifat-sifat lebih sedikit dan dapat digunakan sampai 400°C. Temperatur pengerjaan lebih rendah dari pada poliimid dengan hasil baik. Bahan diproses untuk membuat pernis pemanggang lempeng pelapis, film, dsb.

(3) Polidifenileter

Bahan diturunkan dari difenil oksida, yang unggul dalam ketahanan panas, sifat isolasi listrik, sifat-sifat mekanik dan ketahanan kimia. Terutama sangat cocok dalam sifat isolasi listriknya. Biasanya bahan ini mempunyai ketahanan volum 10^{15} Ω-cm, dan tan δ kira-kira 10^{-3}. Kapasitas absorpsi air rendah yaitu 0,01% dengan pelapis serat gelas. Bahan menunjukkan ketahanan yang baik terhadap zat kimia organik, asam dan alkali. Digunakan untuk cat, alat pemanggang listrik, pelapis, pernis, dsb.

(4) Nilon aromatik (Aramid)

Poliamida aromatik digunakan juga karena kemampuan pengerjaannya baik meskipun agak jelek ketahanan panasnya dari pada poliamid.

Poli-m-fenilenisoftalamid (Nomex, Conex) dan poli-p-fenilentereftalamid (Kevlar) adalah yang khas. Yang pertama digunakan untuk film dan serat pada temperatur yang agak lebih rendah dari pada poliamid, sedangkan yang terakhir terutama dibuat dalam bentuk serat dengan ketahanan panas yang lebih baik dari pada yang pertama. Kemungkinannya digunakan sebagai bahan komposit untuk daerah yang luas. Mengingat masing-masing mungkin terhidrolisa karena bahannya nilon, maka perlu berhati-hati sebelum pemakaian dilakukan.

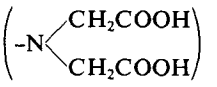
(5) Lain-lain

Polimer jenis parapolifenileter, politiazol, polioksitiazol sebagai satuan struktur yang tahan panas, polimer dengan ikatan sepit logam, polimer anorganik, dan sebagainya, dilaporkan pada tingkat penelitian, tetapi secara praktis tak banyak digunakan.

7 | RESIN PENUKAR ION

Resin penukar ion ini digunakan untuk pelunak air, menghilangkan garam dan warna, pengkonsentrasian, pemisahan dan pemurnian. Digunakan secara luas dalam industri perlakuan air, makanan, farmasi, tenaga atom, dan sebagainya.

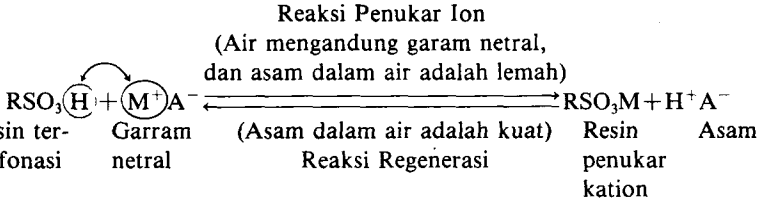
Yang umumnya digunakan secara luas dibuat dari stiren, pada mana divinil benzen dipolimerisasi suspensi untuk membuat resin yang bulat kecil, jadi, seccara berturut-turut dibuat resin asam kuat secara sulfonasi dan resin basa secara klorometilasi atau secara aminasi. Resin basa kuat didapat secara aminasi dengan amin tersier, sedangkan resin basa lemah didapat dengan amin primer dan amin sekunder. Bahan tersebut hampir tak berpori dan biasanya disebut resin gel. Di lain fihak dengan memanfaatkan pelarut, beberapa resin penukar ion dibuat sehingga mempunyai sejumlah pori dari 10 Å atau lebih besar, yang mempunyai luas permukaan dalam yang besar sekali. Resin asam lemah dibuat secara kopolimerisasi asam akrilat, asam metakrilat dengan divinil benzen. Di samping itu ada resin amfoter dengan gugus asam dan basa kedua-duanya, resin oksidasi-reduksi, resin dengan gugus sepit seperti gugus imidiasetat



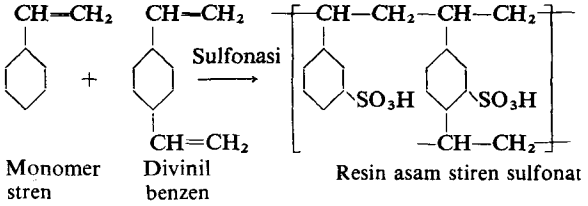
yang menunjukkan karakteristik adsorpsi selektif yang unggul terhadap ion logam berat polivalen, dan sebagainya. Contoh-contoh khas ditunjukkan pada Tabel 3.50.

(1) Resin penukar kation

Polimer organik yang digunakan adalah yang mengandung hidrogen yang mudah disubstitusi. Misalnya, seperti disebut di atas, jenis yang tersulfonasi yang digunakan.



Bila air yang mengandung garam netral dilewatkan melalui resin ini, seperti ditunjukkan pada rumus di atas, ion hidrogen diganti oleh ion logam (M⁺) menjadi asam (H^-A^-). Jadi terbentuk kembali resin penukar kation oleh asam kuat. Sebagai contoh. resin asam stiren sulfonat di bawah ini adalah salah satu dari resin asam striren:



Tabel 3.50 Sifat-sifat umum resin penukar ion.

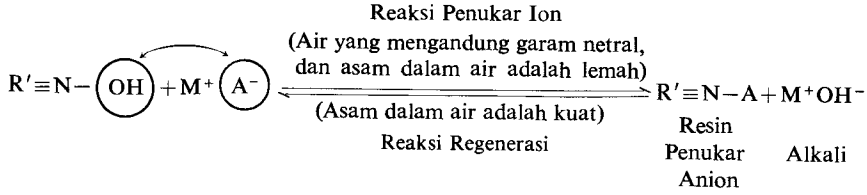
Sifat-sifat	Resin asam kuat		Resin asam lemah	Resin basa kuat	
				Jenis I*	
	Jenis Gel	Jenis MR	Jenis Gel	Jenis Gel	Jenis MR
Gugus penukar	$-SO_3M$	$-SO_3M$	-COOM	$-N$ $-(CH_3)_3X$	$-N$ $-(CH_3)_3X$
Jenis yang dijual	Na	Na	H	Cl	Cl
Bentuk	Bola	Bola	Bola	Bola	Bola
Masa jenis yang dijual (g/*l*)	850	800	750	705	670
Kadar air (%)	44–48	46–51	43–50	42–48	56–62
Diameter efektif (mm)	0,45–0,60	0,45–0,65	0,38–0,46	0,38–0,45	0,40–0,50
Jumlah kapasitas tukar:					
(g $CaCO_3$/*l* resin mengembang)	95,	87,5	175	70	35
(mg ekuivalen/m*l* resin mengembang)	1,9	1,75	3,5	1,4	0,7
(mg ekuivalen/g resin kering)	4,4	4,3	10,3	3,7	2,6
Daerah pH efektif (pH)	0–14	0–14	4–14	0–14	0–14
Luas permukaan spesifik (m^2/g)	<0,1	43	—	<0,1	63
Porositas (m*l*/m*l*)	0,018	0,32	—	0,004	0,51

Sifat-sifat	Resin basa kuat		Resin asam lemah		
	Jenis II*				
	Jenis Gel	Jenis MR	Jenis Gel	Jenis MR	Jenis Gel
Gugus penukar	$-N$ $(CH_3)_2X$ C_2H_4OH	$-N$ $(CH_3)_2X$ C_2H_4OH	$-N(R)_2$ $-NH(R)$ $-NH_2$	$-N(CH_3)_2$	Poliamid
Jenis yang dijual	Cl	Cl	OH	OH	OH
Bentuk	Bola	Bola	Bola	Bola	Butir
Masa jenis yang dijual (g/*l*)	705	690	670	610	560
Kadar air (%)	38–44	42–44	40–45	46–54	40–50
Diameter efektif (mm)	0,38–0,45	0,41–0,48	0,36–0,46	0,40–0,50	0,4–0,6
Jumlah kapasitas tukar:					
(g $CaCO_3$/*l* resin mengembang)	67,5	45	95	70	150
(mg ekuivalen/m*l* resin mengembang)	1,35	0,9	1,9	1,4	3,0
(mg ekuivalen/g resin kering)	3,3	2,4	5,2	4,8	10,0
Daerah pH efektif (pH)	0–14	0–14	0–9	0–9	0–7
Luas permukaan spesifik (m^2/g)	—	45	nil	25	—
Porositas (m*l*/m*l*)	—	0,40	nil	0,48	—

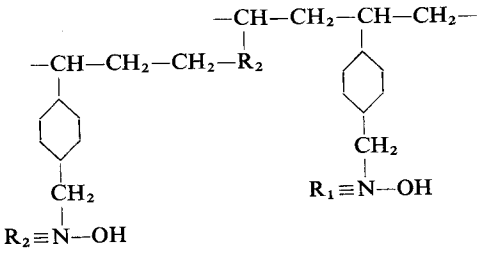
"AMBERLITE", "DIAION", "DOWEX", "DUOLITE", "LEWATIT" adalah nama dagang resin
*Jenis I: Trimetilamin, Jenis II: Dimetiletanolamin

(2) Resin penukar anion

Bahan ini adalah polimer anorganik yang mengandung gugus hidroksil (OH) yang mudah disubstitusi.



Seperti ditunjukkan dalam rumus di atas, misalnya, resin yang mengandung amonium kuaterner ($\equiv$NaOH) melewati air yang mengandung asam netral diganti menjadi ion hidroksil ($-$OH) dan anion ($-A^-$) dan menghasilkan alkali. Jadi garam resin amonium kuaterner yang terbentuk diubah lagi menjadi resin amonium kuaterner dalam alkali kuat. Sebagai contoh, dipakai amonium kuaterner divinil stiren.



(3) Penggunaan

Dalam perlakuan air, pelunakan air sadah, pembuatan air murni dengan penghilangan: garam, alkali dan kapur, di berbagai industri di mana diperlukan air murni, sebagai misal dalam bidang tenaga listrik dan tenaga nuklir dan bidang lainnya, penggunaannya sangat luas. Juga dipergunakan untuk berbagai maksud dalam industri makanan seperti penghilangan garam dan warna dari kanji, sirop, glukosa, sakarida, pemurnian alkohol, pemisahan dan pemurnian asam amino, penghilangan bau, pemrosesan produk susu sapi, dan seterusnya. Dalam bidang farmasi: ekstraksi, pemisahan dan pemurnian zat antibiotik, vitamin, enzim, dan seterusnya, atau kadang-kadang resin penukar ion langsung digunakan sebagai bahan farmasi. Dalam industri tenaga atom, dipergunakan untuk ekstraksi, pemisahan dan pemurnian dari uranium maupun buangan limbah bahan radioaktif. Selanjutnya, dipergunakan dalam bidang-bidang yang sangat luas, yaitu pengambilan kembali logam berat, penggunaan kembali, atau analisis dan pemisahan dalam bidang penelitian.

Membran penukar ion adalah resin penukar ion yang dibuat dalam bentuk membran, yang mempunyai tahanan listrik rendah dan sangat permeabel terhadap ion terseleksi, jadi membran penukar kation secara selektif melewatkan kation, sedangkan membran penukar anion melewatkan anion. Bila membran penukar kation dan anion disusun yang satu setelah yang lain dan dielektrodialisiskan, terjadi penghilangan garam dan pengkonsentrasian. Produksi garam meja dengan pengkonsentrasian air laut, produksi air minum dari air laut dengan penghilangan garam, dan seterusnya, dilakukan secara industri, dan dengan elektrolisis diafragma membran penukar ion, produksi soda kostik dilakukan secara besar-besaran menggantikan metoda merkuri.

8 PENGGUNAAN

Penggunaan bahan polimer sebagai serat, film, bahan komposit dan lainnya. di bawah ini dijelaskan sampai kepada pencetakannya dan sebagainya.

8.1 Serat dan film

8.1.1 Serat

Seperti ditunjukkan dalam Tabel 3.51, banyak jenis serat baik serat alam maupun serat sintetik. Serat alam yang utama adalah kapas, wol, sutra dan rami (hemp), sedangkan serat sintetik adalah rayon, poliester, akril dan nilon. Masih banyak jenis

Tabel 3.51 Klasifikasi serat.

"SERAT TEKSTIL"
- ◉Serat kimia atau serat buatan
  - **Serat regenerasi**
    - Selulosa
      - ((Rayon)) Rayon viskus
      - Rayon biasa
      - ((Serat polinosik))
      - ((Kupra)) [Rayon kuprammonium]
  - **Serat semi sintetik**
    - Selulosa
      - ((Asetat))
      - Asetat
      - ((Triasetat))
    - Serat protein
      - ((Promiks))
  - **Serat sintetik**
    - Poliamid ((Nilon))—Nilon 6, Nilon 66, Nilon aromatik
    - Polivinil alkohol ((Vinilon))
    - Poliviniliden klorida ((Viniliden))
    - Polivinil klorida ((Polivinil klorida))
    - Poliester ((Poliester))
    - Poliakilonitril ((Akril))—Akril ((Akril))
    - Polietilen ((Polietilen))
    - Polipropilen ((Polipropilen))
    - Polialkileneparaoksibenzoat ((Benzoat))
    - ((Poliklal))
    - Lainnya—Fenol, polifluoroetilen
  - **Serat anorganik**—Serat gelas ((gelas)), serat karbon
- ◉Serat alam
  - **Serat tumbuhan**—Kapas, flaks, rami, jut
  - **Serat binatang**—Wol, sutra
  - **Serat galian**—Asbes

Catatan: (( ))—Nama dipakai dalam peraturan yang menyatakan kualitas.
[ ]—Nama tambahan

lainnya dibuat untuk memenuhi keperluan seperti ditunjukkan dalam tabel, sedangkan yang disebut di atas adalah jenis yang paling dikenal. Setiap serat sintetik terdiri dari rantai polimer, dan kebanyakan merupakan polimer berkristal. Oleh karena itu sifat kimianya tergantung pada struktur rantai polimer tersebut. Serat mempunyai bentuk tipis dan panjang, dan mempunyai ciri-ciri cukup pada struktur dalamnya. Berkenaan dengan molekul komponen bahan yang telah dijelaskan terdahulu, orientasi bukanlah sesuatu yang khusus, tetapi dalam molekul rantai serat, semua tersusun dalam arah memanjang, yaitu bahwa arah rantai molekul adalah menurut arah panjang serat, ini merupakan suatu aturan yang tetap. Dilihat dari kenyataan, kekuatan tarik, modulus elastik pada arah memanjang (modulus Young), keduanya menunjukkan harga yang sangat besar. Sebagai contoh, kalau sepotong nilon cetakan dibandingkan dengan serat nilon, kekuatan tarik dan modulus Young dari serat, jauh lebih besar. Kekuatan melar dari serat adalah cukup baik.

Satuan yang berhubungan dengan ketebalan serat merupakan sifat spesifik. Satuan yang biasa dipergunakan sekarang adalah satuan denier. Satu denier (d atau D) adalah berat dalam gram dari serat sepanjang 9000 m. Kalau berat 9000 m serat adalah 5 gram, disebut 5d. Karena adanya berbagai satuan yang menyatakan ketebalan serat dan benang memberikan kesukaran, maka organisasi standar internasional menyarankan untuk mempergunakan satuan teks yaitu berat serat sepanjang 1000 m, 10 teks berarti bahwa berat 1000 m serat tersebut adalah 10 gram. Maka satuan ini biasa dipakai untuk semua macam benang dan serat.

Tabel 3.52 (A)-(E) menunjukkan sifat-sifat khas serat. Di samping sifat-sifat tersebut, ketahanan abrasi dan ketahanan lelah bagi nilon dan poliester adalah sangat baik sedangkan bagi asetat dan rayon agak buruk. Serat yang diinginkan dapat dipilih dari tabel-tabel tersebut.

8.1.2 Film

Berbagai macam film dibuat dari bahan polimer menurut jenis polimer, ketebalan, warna, perlakuan permukaan, laminasi, pelapisan dan lain sebagainya. Dengan mempergunakan jenis polimer yang sama, sifat yang cukup berbeda didapat menurut cara dan keadaan bagaimana film dicetak. Tabel 3.53 merupakan klasifikasi menurut komponen. Pertama, adalah selopan yang dibuat dari selulosa yang diregenerasi, kepadanya dicampurkan gliserin, dietilen glikol dan turunan glikol lainnya agar melunak. Tergantung jenis dan kadar, sifat-sifatnya berbeda banyak, bersifat hidrofil dan permeabel terhadap uap dan seterusnya. Oleh karena itu selopan yang tahan air dibuat dengan melapisinya oleh kopolimer vinil klorida-vinil asetat agar mempunyai sifat tahan air dan uap.

Kebanyakan dari film biasa dibuat dari polimer termoplastik yaitu: polietilen, polipropilen, polivinil klorida, poliester dst. Film poliester dibuat untuk pita video, pita magnet untuk komputer, kaset, dst. Biasanya film yang terorientasikan dibuat sebagai berikut: film dicetak dengan cara biasa dipanaskan pada temperatur yang cocok antara titik cair (T_m) dan temperatur transisi gelas (T_g), dari polimer sabagai bahan kaku, kemudian diregangkan 2 sampai 10 kali ke arah memanjang dan melintang untuk mendapat orientasi molekul. Film yang diregangkan menghasilkan sifat-sifat yang sangat lebih baik dalam sifat: tembus cahaya, kilatan, kekuatan tarik, kekuatan impak, ketahanan panas, kegetasan temperatur rendah, dan sebagainya, kalau dibandingkan dengan film yang tidak diregangkan. Hal tersebut disebabkan oleh adanya orientasi molekul karena penarikan. Akan tetapi umumnya ketahanan terhadap robekan menurun pada arah melintang. Sifat mudah robek tersebut

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (A-1).

Sifat-sifat \ Jenis	Kapas	Wol
Kekuatan tarik (g/d):	3,0–4,9	1,0–1,7
Standar Basah	3,3–6,4	0,76–1,63
Tenasitas jenis kering/basah (%)	102–110	76–96
Kekuatan lup (g/d)		
Kekuatan simpul (g/d)		
Perpanjangan (%)	3–7	25–35
Standar Basah		25–50
Perpanjangan elastis (%) Perpanjangan 3%	74 (2%) 45 (5%)	99 (2%) 63 (20%)
Ketahanan tarik asal (Modulus Young) (g/d)	68–93	11–25
(kg/mm^2)	950–1300	130–300
Berat jenis	1,54	1,32
Kadar air kembali (%) Resmi	8,5	15
Standar (20°C, 65% RH)	7	16
Lainnya (20°C, 20% RH) (20°C, 95% RH)	24–27 (95%)	22 (95%)
Pengaruh panas	Kuning pada 120°C 5 jam terurai pada 150°C	Terurai pada 130°C Terbakar pada 205°C Dikarbonkan pada 300°C
Ketahanan cuaca (di luar)	Kekuatan menurun, akan berubah kekuning-kuningan	Kekuatan menurun, mampu cetak rusak
Pengaruh asam	Terurai dalam asam encer panas, asam pekat dingin, tak berubah dalam asam encer dingin	Terurai dalam H_2SO_4 Tahan asam kuat/lemah walau dipanaskan
Pengaruh alkali	Mengembang dalam NaOH tetapi tidak rusak	Terurai dalam alkali kuat rusak dalam alkali lemah lunak dalam alkali dingin encer
Pengaruh bahan kimia lainnya	Diputihkan oleh hipoklorit, peroksid, mengembang atau terurai oleh larutan Kuproamonium	Diputihkan oleh peroksid atau gas asam belerang
Pengaruh larutan: (Umum) Pelarut: Alkohol, eter, benzen, aseton, bensin, Perklene	Umumnya tidak larut	Umumnya tidak larut
Zat warna yang bisa dipakai	Dapat dicelup dingin direk bejana, azo, basa, mordan, belerang & pigmen	Dapat dicelup dengan: asam, miling, krome, mordan, indigo, bejana
Pengaruh serangga dan jamur	Tahan serangga, rusak oleh jamur Baik diputihkan/asetilasi	Rusak oleh serangga, tapi tahan jamur

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (A-2).

Sifat-sifat \ Jenis	Sutra	Hemp	
		Flaks	Rami
Kekuatan tarik (g/d): Standar	3,0–4,0	5,6–6,3	6,5
Basah	2,1–2,8	5,8–6,6	7,7
Tenasitas jenis kering/basah (%)	70	108	118
Kekuatan lup (g/d)		8–9	9,3
Kekuatan simpul (g/d)	2,9	4,5–4,8	5
Perpanjangan (%) Standar	15–25	1,5–2,3	1,8–2,3
Basah	27–33	2,0–2,3	2,2–2,4
Perpanjangan elastis (%) Perpanjangan 3%	54–55 (8%)	84 (1%)	84 (1%) 48 (2%)
Ketahanan tarik asal (Modulus Young) (g/d)	50–100	185–405	
(kg/mm^2)	650–1200	2500–5500	
Berat jenis	1,33–1,45	1,5	
Kadar air kembali (%) Resmi	11,0	12	
Standar (20°C, 65% RH)	9	7–10	
Lainnya (20°C, 20% RH) (20°C, 95% RH)	36–39 (100%)	23 (100%)	31 (100%)
Pengaruh panas	Terurai pada 235°C Terbakar pada 275–456°C Menyala pada 366°C	Kuning pada 130°C, 5 jam Terurai pada 200°C	
Ketahanan cuaca (di luar)	Kekuatan menurun sangat 55% dalam 60 hari, 65% dalam 140 hari	Berubah menjadi kuning coklat, kekuatan berkurang	
Pengaruh asam	Terurai dalam H_2SO_4 panas kurang tahan terhadap asam lain dibanding wol	Kuning pucat, rusuh oleh HNO_3 panas	Mengembang oleh H_2SO_4 pekat
Pengaruh alkali	Serisin mudah larut, fibro in sebagian rusak Agak lebih baik wol	Mengembang, tetapi tidak rusak	
Pengaruh bahan kimia lainnya	Diputihkan oleh peroksid atau gas asam belerang	Tahanan yang lemah terhadap oksidator	
Pengaruh larutan: (Umum) Pelarut: Alkohol, eter, benzen, aseton, bensin, Perklene	Umumnya tidak larut	Umumnya tidak larut	
Zat warna yang bisa dipakai	Direk, asam, basa, mordan	Zat warna: direk, naptol, bejana	
Pengaruh serangga dan jamur	Tekan jamur, tapi lebih lemah dari kapas terhadap serangga	Tahan serangga, rusak oleh jamur	

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (B).

Sifat-sifat \ Jenis	Serat kimia		
	Serabut karbon		Serabut fluoro
	Elastisitas rendah	Elastisitas tinggi	
Kekuatan tarik (g/d): Standar	6,5–7,5	16–21	1,0–2,5
Basah			1,0–2,5
Tenasitas jenis kering/basah (%)			100
Kekuatan lup (g/d)			2,0–4,0
Kekuatan simpul (g/d)			1,0–3,0
Perpanjangan (%): Standar	2,3–2,7	0,9–1,1	25–50
Basah			25–50
Elastisitas Perpanjangan (%) (perpanjangan 3%)			80–100
Tahanan tarikan (Modulus Young) (g/d)	250–300	1300–1600	5–20
(kg/mm^2)	3700–4300	20000–25000	95–400
Berat jenis	1,58–1,60	1,70–1,80	2,1–2,2
Menyerap air (%) Resmi			0
Standar (20°C, 65% RH)	2–10	0,0	0
Lainnya (20°C, 20% RH) (20°C, 95% RH)			0 (20%) 0 (95%)
Pengaruh panas	Dioksidasi pada 300°C dalam O_2. Tidak berubah sampai 400°C dalam N_2		Titik didih: 372°C (Dipakai pada 260°C)
Tahanan cuaca (di luar)	Tidak ada panurunan kekuatan		Kekuatan tidak menurun
Pengaruh asam	Tidak ada		Tidak ada
Pengaruh alkali	Tidak ada		Tidak ada
Pengaruh bahan kimia:	"		Sedikit tererosi dalam gas fluoro, klorin trifluorida, logam alkali yang difusikan pada temp. tinggi tekanan tinggi.
Pengaruh larutan: (Larutan umum: alkohol, eter, benzen, aseton, bensin, perklen)	"		Tidak ada
Celup warna	Tidak dapat dicelup		Tidak dapat dicelup dengan bahan celup umum
Pengaruh serangga, jamur	Tahan		Tahan

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (C).

Jenis / Sifat-sifat	Rayon	
	Serabut biasa	Serat pendek polinosik
Kekuatan tarik (g/d): Standar	1,7–2,3	3,5–5,2
Basah	0,8–1,2	2,6–4,2
Tenasitas jenis kering/ basah (%)	45–55	70–80
Kekuatan lup (g/d)	3,0–4,1	1,0–2,2
Kekuatan simpul (g/d)	1,4–2,0	1,0–2,5
Perpanjangan Standar	18–24	7–14
Basah	24–35	8–15
Perpanjangan elastik (%) (Perpanjangan 3%)	60–80	60–85
Tahanan tarikan (Modulus Young) (g/d) (kg/mm^2)	65–85 850–1150	70–110 950–1500
Berat jenis	1,50–1,52	
Menyerap air Resmi	11,0	
Standar (20°C, 65% RH)	12,0–14,0	
Lainnya (20°C)	20% RH: 4,5–6,5 95% RH: 25,0–30,0	
Pengaruh panas	Tidak melunak dan berfusi. Kehilangan warna & terurai pada 260–300°C	
Ketahanan cuaca (di luar)	Kekuatan sedikit menurun	
Pengaruh asam	Kekuatan dikurangi dengan larutan asam panas dan asam dingin yang pekat, dan terurai	
Pengaruh alkali	Mengembang oleh alkali kuat & kekuatan menurun pada 2% NaOH kekuatan tidak menurun	Mengembang oleh alkali kuat & kekuatannya menurun pada 4,5% NaOH kekuatan tidak menurun
Pengaruh bahan kimia	Rusak karena oksidator kuat, tapi tidak rusak oleh hipoklorit, peroksida dst.	
Pengaruh larutan (Pelarut umum: alkohol, eter, benzen, aseton, bensin perklen)	Tidak larut dalam pelarut umum. Larut dalam larutan kuproamonium, dan kuproetilen diamin	
Zat warna yang dipakai	Zat warna: direk, bejana, basa, naftol, mordan, sulfid, reaktif, pigmen	
Pengaruh serangga dan jamur	Cukup tahan terhadap serangga, tetapi rusak oleh jamur	

Sumber: Japan Synthetic Fiber Association, Technical Committe (Oct. 1976) for chemical fiber, "Textile World" for natural fiber.

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (D).

Sifat-sifat	Serabut (tekanan rendah) Polietilen
Kekuatan tarik (g/d) Standar	5,0–9,0
Basah	5,0–9,0
Tenasitas jenis kering/basah (%)	100
Kekuatan lup (g/d)	6,2–13,0
Kekuatan simpul (g/d)	3,5–5,7
Perpanjangan (%) Standar	8–35
Basah	8–35
Modulus tarik (%) (perpanjangan 3%)	85–97
Tahanan tarikan asal (Modulus Young) (g/d)	35–100
(kg/mm^2)	300–850
Berat jenis	0,94–0,96
Kadar air (%) Resmi	0
Standar (20°C, 65% RH)	0
Lainnya (20°C, 20% RH)	0
(20°C, 95% RH)	0–0,1
Pengaruh panas	Titik lunak 100–115°C Titik fusi 125–135°C
Tahan cuaca di luar	Kuat, sukar menurun
Pengaruh asam	Sukar menurun dalam HCl pekat H_2SO_4 pekat
Pengaruh alkali	Sukar menurun dalam NaOH pekat
Pengaruh bahan kimia lain	Sukar berubah
Pengaruh larutan Larutan umum: alkohol, eter benzen, aseton, bensin, Perklen	Tidak larut dalam alkohol, eter aseton. Mengembang pada temperatur tinggi dalam benzen, bensin. Larut perlahan pada temp. tinggi dalam perklen, etan tetraklorida
Zat warna umum dipakai	Umumnya dicelup oleh pigmen
Pengaruh serangga, jamur	Tahan sama sekali

Tabel 3.52 Sifat-sifat serat (E) (serabut).

Sifat-sifat	Vinilon	Nilon biasa	Nilon 66
Kekuatan tarik (g/d) Standar	3,0–4,0	4,8–6,4	5,0–6,5
Basah	2,1–3,2	4,2–5,9	4,5–6,0
Tenasitas jenis kering/basah (%)	70–80	84–92	90–95
Kekuatan lup (g/d)	4,5–6,0	8,5–11,5	8,5–11,5
Kekuatan simpul (g/d)	2,2–3,0	4,3–6,0	4,5–6,0
Perpanjangan (%) Standar	17–22	28–45	25–38
Basah	17–25	36–52	28–45
Modulus tarik (%): Perpanjangan (3%)	70–90	98–100	98–100
Ketahanan tarik asal (Modulus Young) (g/d)	60–90	20–45	30–52
(kg/mm^2)	700–950	200–450	300–520
Berat jenis	1,26–1,30	1,14	
Kadar air (%) Resmi	5,0	4,5	
Standar (20°C, 65% RH)	3,5–4,5	3,5–5,0	
Lainnya (20°C, 20% RH)	1,2–1,8	1,0–1,8	
(20°C, 95% RH)	10,0–12,0	8,0–9,0	
Pengaruh panas	Titik lunak: 220–230°C Titik cair: tidak diketahui	Titik lunak: 180°C Titik cair: 215–220°C	Titik lunak: 230–235°C Titik cair: 250–260°C
Tahan cuaca (di luar)	Kekuatan sukar dikurangi	Kekuatan dikurangi dan sedikit kehilangan warna	
Pengaruh asam	Mengembang atau terurai dalam HCl pekat, H_2SO_4 pekat dan HNO_3 pekat	Larut, sebagian terurai dalam HCl pekat, H_2SO_4 pekat dan HNO_3	
Pengaruh bahan kimia lain	Kekuatan sukar dikurangi dalam NaOH pekat	Kekuatan sukar dikurangi dalam NaOH pekat, larutan amonia pekat	
Pengaruh bahan kimia lain	Umumnya tahan baik	Umumnya tahan baik	
Pengaruh larutan: (Larutan umum: alkohol, eter, benzen, aseton, bensin, perklen)	Tidak larut dalam pelarut umum. Mengembang atau larut dalam piridin panas, fenol, kresol dan asam pekat	Tidak larut dalam pelarut umum. Larut dalam fenol, (fenol m-kresol dsb) asam format pekat. Mengembang dalam asam asetat glasial larut dengan panas	
Zat warna yang umum dipakai	Zat warna: Bejana, bejana sulfer, bejana larut, logam kompleks, sulfida, naftol, direk, pigmen. asam, disperse, diperse mengembang	Zat warna: asam, disperse, reaktif dan krome	
Pengaruh serangga, jamur	Tahan sama sekali	Tahan sama sekali	

Tabel 3.53 Film polimer.

	Struktur dasar dari komponen utama	Penggunaan	Keterangan
Selulosa diregenerasi: Selopan biasa	Selulosa diregenerasi	Pengemasan	
Selopan tahan lembab	Selulosa diregenerasi Membran tahan lembab	Pengemasan	Kopolimer klorid/vinil asetat atau jenis lakuer terutama terdiri dari nitroselulosa, juga kopolimer dilapisi viniliden klorid/akrilonitril bisa diperoleh.
Turunan selulosa Film diasetat	Selulosa diasetat	Film foto, pita	
Film triasetat	Selulosa triasetat	Pita rekorder	
Poliolefin: Film polietilen	$-CH_2-CH_2-CH_2-CH_2-$	Pengemasan pertanian	Cukup berubah dalam masa jenis tinggi atau rendah. Juga berubah menurut cara pembuatan. Kadang-kadang diikat silangkan oleh radiasi.
Film polipropilen	$-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{\vert}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle CH_3}{\underset{\vert}{CH}}-$	Pengemasan	Sifat fisik cukup berbeda antara yang diregangkan dua arah sumbu dan yang tidak.
Polivinil klorida: Film PVC fleksibel/kaku	$-CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{\vert}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle Cl}{\underset{\vert}{CH}}-$	Pengemasan, pertanian	Kaku tanpa bahan pemlastis dan fleksibel dengan bahan itu. Diregangkan dua arah sumbu agar menyusut.
Polivinilidin klorida: Film Saran	$-CH_2-\underset{\displaystyle Cl_2}{\underset{\vert}{C}}-CH_2-\underset{\displaystyle Cl_2}{\underset{\vert}{C}}-$	Pengemasan untuk makanan yang diproses	Dengan dan tanpa penyusutan panas. Terutama kopolimer viniliden klorid dan vinil klorid.
Poliester: Film polietilen tereftalat	$-CH_2CH_2-O-COC_6H_4\cdot CO-$	Bahan isolasi	Film ester campuran mengandung sedikit isoftalat. Beberapa film memiliki penyusutan panas.
Film polikarbonat	$-OC_6H_4\cdot C_3H_5\cdot C_6H_4\cdot CO_2-$	Bahan isolasi	
Polistiren: Film polistiren	$-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{\vert}{CH}}-CH_2-\underset{\displaystyle C_6H_5}{\underset{\vert}{CH}}-$	Pengemasan, isolasi	Beberapa mempunyai penyusutan panas.
Poliamid: Film nilon	$-NHC_6H_4CO\cdot NHC_6H_4-CO-$	Pengemasan	Nilon 11, Nilon 66 & Nilon 610 dapat diperoleh.

dipergunakan untuk merobek film dalam proses penggunaan. Ketahanan terhadap uap air dan gas diperbaiki oleh peregangan. Sifat masing-masing dan contoh film yang cocok diutarakan di bawah ini:

(1) Sifat-sifat mekanik

Pada umumnya, film yang telah diregangkan mempunyai kekuatan tarik yang tinggi dan perpanjangan serta kekuatan robek yang rendah. Meregangkan polietilen, polipropilen, nilon dan poliester yang mempunyai masa jenis tinggi menghasilkan sifat-

sifat mekanik yang unggul. Film yang tidak diregangkan dan film yang dikembungkan mudah diregangkan ke arah tertentu, jadi diperlukan pemilihan yang baik agar dapat memenuhi keperluan yang diinginkan.

(2) Permeabilitas uap air

Sifat ini sangat tergantung kepada bahan polimer. Poliviniliden klorida, polietilen dan polipropilen adalah bahan yang kurang permeabel.

(3) Permeabilitas gas

Sifat ini agak berubah-ubah tergantung pada jenis gas, tetapi poliviniliden klorida, selopan, polivinil alkohol nilon dan poliester merupakan bahan yang kurang permeabel terhadap oksigen. Hal yang serupa bagi selopan, polivinil alkohol, poliviniliden klorida, nilon dan poliester adalah sangat baik dalam sifat menghalang gas karbon dioksida.

(4) Sifat optik

Penembusan cahaya adalah baik pada poliester, polikarbonat polistiren triasetat dan seterusnya.

(5) Ketahanan panas

Film fluororesin paling baik ketahanan panasnya. Yang dapat menahan air mendidih adalah nilon, poliester, polietilen masa jenis tinggi, polikarbonat, film polistiren, dan yang tahan terhadap temperatur dingin adalah polietilen, polipropilen, poliviniliden klorida, poliester dan nilon.

Di samping itu film polietilen dan polipropilen diregangkan sangat, dalam pembuatan benang pisah dan benang geser untuk tali, tambang, dan benang tenun yang banyak sekali.

8.2 Bahan komposit

Sudah umum bahwa resin fenol, resin urea, resin melamin dan resin termoset lainnya yang sukar dicetak dan kurang kuat pada penggunaan tunggalnya, dipakai untuk menjenuhkan bubuk kayu, pulp, kertas, kain kapas, dan seterusnya, untuk memperkuat dan secara praktis dipergunakan untuk pelapisan bahan dalam penggunaan yang luas. Sebagai bahan komposit dan plastik yang diperkuat yang sekarang banyak dipakai adalah: serat gelas, serat karbon, whisker, asbes, dan seterusnya; merupakan komposit yang diperkuat antara resin dan serat. Dalam hal ini hampir semua bahan polimer dipergunakan dari mulai resin termoset yaitu poliester, epoksi, fenol, dan seterusnya, sampai resin termoplastik, yaitu poliamid, polikarbonat, polietilen tereftalat, dan seterusnya.

Pada umumnya yang disebut plastik diperkuat serat (FRP) adalah resin termoset diperkuat oleh serat, dan termoplastik diperkuat serat (FRTP) adalah yang mempergunakan resin termoplastik. Yang diperkuat dengan serat gelas disebut plastik diperkuat gelas (GRP) atau termoplastik diperkuat gelas (GRTP). CFRP adalah plastik diperkuat serat karbon.

Pada umumnya bahan komposit adalah kombinasi antara dua atau lebih dari tiga bahan yang memiliki sejumlah sifat yang tidak mungkin dimiliki oleh masing-masing komponennya. Dalam pengertian ini sudah barang tentu kombinasi tersebut tidak perlu terbatas kepada bahan polimernya, tetapi mencakup bahan logam dan keramik. Dalam buku ini pembahasan dibatasi pada komposit dengan bahan polimer saja.

8.2.1 Penguatan

Bahan penguat yang paling sering dipakai adalah serat gelas. Sebagai bahan baku serat, umumnya dipakai gelas non-alkali (gelas jenis E). Serat gelas ini memiliki kekuatan tarik yang tinggi, kira-kira 1000 kali lebih kuat dari kawat baja (90 kgf/mm^2). Selanjutnya masa jenisnya kira-kira 2,5 adalah rendah dibandingkan dengan baja (7,9), sedangkan modulus elastiknya agak rendah. Sekarang, penggunaan serat karbon sangat meningkat. Serat karbon (serat grafit) dibuat dari serat akrilik disinter dan digrafitkan. Serat ini kekuatannya lebih rendah dari pada serat gelas, tetapi dapat diabaikan, sedangkan modulus elastiknya baik sekali. Massa jenisnya kira-kira 1,8–1,9 lebih rendah dari gelas, jadi lebih ringan. Karena memiliki sifat yang lebih baik dalam kekuatan per massa jenis dan modulus elastiknya, dibanding dengan bahan lain, maka produksinya meningkat pesat yang dipergunakan sebagai bahan bagi pesawat terbang, mobil, tongkat golf, tangkai pancing dan banyak lagi penggunaan lainnya dari barang industri sampai barang-barang untuk kesenangan di mana diperlukan sifat ringan tetapi kuat dan elastis.

Selanjutnya, sekarang ini, bahan seperti Kevlar (poliparafenilen-tereftalamid) salah satu dari amid aromatik dikembangkan secara besar-besaran sebagai penguat untuk bahan komposit yang memiliki sifat ringan (massa jenis 1,4) dan kekuatan tariknya tinggi. Di samping itu dipakai juga whisker, silikon karbida (SiC), boron dan sebagainya. Tetapi apabila diurutkan dari mulai yang paling banyak dipakai, adalah pertama serat gelas, kemudian serat karbon dan Kevlar, baru serat organik. Tabel 3.54 menunjukkan kekuatan, modulus elastik, modulus elastik spesifik dari berbagai plastik yang diperkuat.

(1) Resin termoset

Adalah perlu memilih bahan komposit yang cocok menurut sifat-sifatnya yang telah dijelaskan agar dapat memperkuat matriks dari komposit.

Persyaratan di bawah ini perlu dipenuhi untuk pencetakan bahan komposit:

1) Resin yang dipakai perlu memiliki viskositas rendah, dapat sesuai dengan bahan penguat dan permeabel.
2) Dapat dikur pada temperatur kamar dalam waktu yang optimal.
3) Mempunyai penyusutan yang kecil, pada pengawetan.
4) Memiliki kelengketan yang baik dengan bahan penguat.
5) Mempunyai sifat baik dari bahan yang diawetkan.

Tidak ada bahan yang dapat memenuhi semua persyaratan di atas, tetapi pada saat ini paling banyak dipakai adalah poliester tak jenuh.

Tabel 3.54 Beberapa sifat serat unggul.

Serat	Kekuatan tarik ($GN\ m^2$)	Perpanjangan patah (%)	Masa jenis (g/cm^3)	Modulus Young (GN/m^2)	Modulus jenis (MJ/kg)
Karbon (Dasar rayon viskus)	2,0	0,6	1,66	350	210
Karbon* (Dasar PAN)	1,8	0,5	1,99	400	200
Gelas (Jenis E)	3,2	2,3	2,54	75	30
Baja	3,5	2,0	7,80	200	26
Kevlar	3,2	6,5	1,44	57	40
Nilon 66	0,9	14,0	1,14	7	6
Poliester	1,1	9,0	1,38	15	11

*Jenis modulus tinggi

(2) Resin termoplastik

Berbagai resin dipergunakan, tetapi peningkatan kekuatan seperti pada resin termoset tidak dapat diharapkan. Hal-hal yang perlu diperbaiki adalah:

1) Supaya memiliki penyusutan cetakan lebih kecil dan ketelitian dimensi yang lebih baik.
2) Agar temperatur deformasi termal dengan bahan berkristal dapat dinaikkan.
3) Agar kekuatan tarik dan kekuatan lentur dapat diperbaiki.

(3) Hubungan antara penguat dan panjang serat ada beberapa rumus yang dapat dipergunakan

Salah satu hubungan yang paling sederhana adalah:

$$\delta_c = V_f\left(1-\frac{L_c}{L}\right)\delta_f + V_R\delta_R$$

$$\frac{L_c}{D_f} = \frac{\delta_f}{2\tau_y}$$

Di mana

Δ_c : Kekuatan tarik barang yang dicetak
V_f : Kadar serat dalam volum
V_R : Kadar resin dalam volum
L : Panjang serat
δ_R : Kekuatan tarik resin
D_f : Diameter serat
δ_f : Kekuatan tarik serat
L_c : Panjang kritis dari serat
τ_y : Kekuatan mulur geser pada antar muka serat dengan resin.

8.3 Pencetakan

Pencetakan bahan polimer dilakukan dengan berbagai cara. Berikut ini dikemukakan beberapa hal yang penting saja.

(1) Pencetakan dengan tekanan

Salah satu cara yang umum dipakai adalah pencetakan tekan. Bahan yang akan dicetak diletakkan dalam bagian cekung dari cetakan yang telah dipanaskan dan kemudian ditekan, ini dilakukan pada mesin pres cetak tekan. Bahan yang dipanaskan dalam cetakan mempunyai kemampuan alir yang cukup untuk mengisi cetakan, kemudian terjadi reaksi pengawetan, pengesetan, dan selanjutnya dikeluarkan dari cetakan setelah lama waktu yang optimal. Proses ini dilakukan terutama pada bahan termoset seperti resin fenol, resin urea, resin melamin, dan seterusnya.

(2) Pencetakan alih

Salah satu metoda pencetakan resin termoset adalah pencetakan alih. Bahan dipanaskan dan dilunakkan dalam ruang pemanas, kemudian dipaksa masuk melalui nosel, ke dalam cetakan dan di situ diawetkan. Proses ini dapat digolongkan pada salah satu pencetakan injeksi dari resin termoset, tetapi bedanya terletak pada suplai bahan yang dilakukan satu kali pada satu saat.

(3) Pencetakan injeksi

Metoda pencetakan ini merupakan proses yang penting bagi resin termoplastik. Kadang-kadang dipakai juga untuk resin termoset. Bahan yang akan dicetak dipanaskan dan mencair plastis dalam silinder, kemudian diinjeksikan ke dalam cetakan dengan tekanan yang tinggi, dan didinginkan serta diawetkan di dalam cetakan, kemudian cetakan dibuka untuk mengeluarkan benda cetak. Metoda ini dapat diotomasikan untuk meningkatkan produksi.

(4) Pencetakan ekstrusi

Resin termoplastik yang dipanaskan sampai cair (plastis) diekstrusi secara kontinu melalui lubang cetakan. Mesin ekstrusi terdiri dari cetakan dan unit penekan. Cetakan memberikan bentuk dan unit penekan mendorong bahan keluar dari lubang cetakan, mendinginkan dan mengontrol bentuk serta dimensi hasil ekstrusi. Proses ini banyak dipakai untuk membuat batang, pipa, lembaran tipis, film, kertas, laminasi pada logam, serat, jaring, pelapis kawat, dan seterusnya. Ekstrusi film tiupan adalah satu penggunaan dari metoda ini.

(5) Pencetakan tiup

Pipa yang diekstrusi dari mesin ekstrusi disumbat dalam cetakan dan udara ditiupkan ke dalam pipa agar menggembung mengikuti bentuk cetakan menjadi bentuk botol kosong misalnya. Metoda ini dipakai untuk polietilen, polivinilklorida, nilon dan polikarbonat.

(6) Pengkalenderan

Resin dibuat lembaran tipis dengan mempergunakan rol panas menjadi film, lembaran tipis, kulit tiruan, tegel, dan seterusnya. Metoda ini dipakai untuk resin polivinil dan umumnya karet, juga untuk resin selulosa, resin metakrilat dan resin ABS.

(7) Pengecoran

Bahan polimer cair, misalnya resin termoset asal kondensat, monomer resin termoplastik atau polimer parsial, resin termoplastik cair panas, dicor ke dalam cetakan dan membeku umumnya pada tekanan biasa. Metoda ini dipakai untuk resin fenol, resin urea, resin poliester tak jenuh, resin silikon, resin epoksi, resin poliuretan, resin metakrilat, dan resin poliamid.

(8) Pelapisan pasta, perendaman, dan seterusnya

Ada beberapa metoda yang dipakai, misalnya pencetakan dalam keadaan pasta, perendaman cetakan ke dalam bahan dalam organosol, dan seterusnya.

(9) Pencetakan plastik yang diperkuat

Bahan polimer yang diperkuat dengan serat dapat diperoleh dalam berbagai macam bentuk dan dipergunakan secara luas sebagai komponen konstruksi. Dilihat dari cara pembuatan dengan cetakan, banyak bedanya antara resin termoplastik dan resin termoset.

1) Dalam metoda termoplastik, bahan dicampur dengan serat pendek (0,5 mm) dan diproses secara pencetakan injeksi atau ekstrusi seperti pada resin termoplastik biasa.
2) Pencetakan FRP: Suatu contoh yang khas adalah kombinasi dari serat gelas dan poliester tak jenuh.
   a) Pencetakan tekanan kontak: mempergunakan resin set dingin, dicetak

setelah jenuh dengan serat gelas, dan diawetkan. Disebut juga pencetakan tanpa tekanan, karena tidak mempergunakan tekanan sama sekali.

b) Pencetakan cetakan setara: mempergunakan cetakan yang dipanaskan seperti pada pencetakan tekan. Pencetakan ini mempunyai efisiensi tinggi. Dipergunakan cetakan khusus yang dapat dicetak dari serat gelas dan resin cair. Cara ini baik untuk produski massa dari barang-barang kecil.

c) Campuran pencetakan tipis: Setelah penjenuhan serat gelas dalam resin poliester, dipergunakan bahan berupa agar-agar. Untuk ini diperlukan pres tekanan tinggi, tetapi tanpa mempergunakan resin cair; cara ini hampir bebas dari keterbatasan pada struktur dan cetakan. Barang cetakan ini sangat kuat.

d) Campuran pencetakan tebal: Sebagai tambahan terhadap resin dan serat gelas, sejumlah besar bahan pengisi ditambahkan, diaduk menjadi adonan kental putih. Kemudian umumnya diproses dengan pencetakan tekan, tetapi dapat juga dipakai pencetakan injeksi.

e) Penggulungan filamen: Serat gelas yang dijenuhkan resin dililitkan pada satu inti dan dicetak. Barang cetakan yang mengandung serat gelas dan kekuatan tinggi dapat dibuat. Mudah membuat pipa, bola dan bentuk telur dengan cara ini.

(10) Pencetakan busa

Secara kasar dapat digolongkan menjadi bahan busa pembesaran rendah dengan 10 kali atau kurang, dan bahan busa pembesaran tinggi dengan 20–80 kali dari pemuaian. Bagi golongan pertama dipakai pencetakan injeksi atau kadang-kadang pencetakan ekstrusi, sedangkan golongan kedua biasanya dibusakan dengan mempergunakan reaksi gas atau zat pembentuk busa, atau kadang-kadang secara mekanik. Cara yang dipakai adalah cara yang paling cocok dalam memenuhi keperluannya.

Beberapa angka dan daftar-daftar di dalam buku-buku yang tercantum di bawah ini telah dipergunakan di dalam Bagian III buku ini. Pengarang Jepang mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada para pengarang dan penerbit buku-buku ini.

1. Kōbunshi Kagaku Kōza (5), Plastics Seikei Zairyō. ibid, (13), Kōbunshi Zairyō no Kōgakuteki Seishitsu-II (Chijin Shokan Co., Itd.)
2. S. Yamaguchi: Plastic Zairyō Sentaku no Point (Japanese Standard Association)
3. Y. Sakurauchi: Plastic Zairyō Tokuhon. Plastic Gijutsu Tokuhon (Kogyo Chosakai Publishing Co., Ltd.)
4. M. Fujii: Plastics no Jissai Chishiki (Toyo Keizai Shinposha Ltd.)
5. Kōbunshi Jikkengaku Kōza (7), Kōbunshi Zairyō Shikenhō-I. ibid, (13), Kōbunshi no Seikei to Kakō (Kyoritsu Shuppan Publishing Co., Ltd.)

BAGIAN IV

BAHAN KERAMIK

PENDAHULUAN

Keramik adalah bahan padat anorganik yang bukan logam. Barang yang terbuat dari keramik seperti: keramik cina, porselen, gelas, semen, refraktori (bahan tahan api), sejak dahulu telah dipergunakan dalam kehidupan manusia sehari-hari. Bahan keramik adalah bahan dasar penyusun kerak bumi, yaitu: SiO_2, Al_2O_3, CaO, MgO, K_2O, Na_2O dst., yang banyak tersedia di alam. SiO_2, Al_2O_3 atau MgO masing-masing dapat dipakai sebagai bahan keramik tersendiri, sedangkan banyak bahan lainnya yang terdiri dari campuran silikat tunggal atau campuran dari berbagai silikat. Bahan baku dari keramik cina dan porselen adalah tanah liat yaitu kaolin, serisit dst., dan silikat yaitu kuarsa, felspar, dst., yang diaduk dicetak dan dibakar sehingga menjadi produk. Selama pembakaran bahan-bahan tersebut bereaksi satu sama lain. Silikat agak berbeda, dari bahan baku dibentuk mulit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) dan gelas, sehingga dapat dibuat produk yang sifat-sifatnya berbeda dari bahan bakunya.

Di masa lalu keramik umumnya dibuat dari bahan baku alam. Karena terbatasnya kemampuan pengendalian komposisi kimia dan struktur mikronya, maka sifat-sifat asli keramik dalam banyak kasus biasanya tidak nampak jelas.

Akhir-akhir ini, keramik dengan sifat-sifat khasnya yang baru telah dibuat dengan mempergunakan bahan tiruan yang sangat murni dan dengan proses pembuatan yang sangat terkendali. Produk tersebut dinamakan keramik halus atau keramik baru, yang memiliki sifat-sifat khas fungsional dalam elektromagnetik, mekanik, optik, termal, biokimia dan sifat lainnya. Sekarang keramik ini banyak dipakai di berbagai bidang termasuk penggunaan di ruang angkasa, elektronik dan industri mekanik. Di masa mendatang pengembangan keramik akan pesat.

1 KIMIA KRISTAL DARI BAHAN KERAMIK

1.1 Ikatan atom

1.1.1 Struktur atom

Atom terdiri dari inti dengan muatan positip dan elektron dengan muatan negatip; elektron inilah yang mengendalikan sifat-sifat kimia dari atom yang bersangkutan. Di bawah ini diuraikan mengenai elektron dari atom tersebut.

Keadaan energi dari elektron dinyatakan dengan empat bilangan kuantum sebagai berikut:

Bilangan kuantum	*Simbol*	*Nilai*
Bilangan kuantum utama	n	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, . . n *K, L, M, N, O, P, Q* . . .
Bilangan kuantum azimutal	l	0, 1, 2, 3, . . . $(n-1)$ *s, p, d, f* . . . .
Bilangan kuantum magnetik	m	l, $(l-1)$, . . . 1, 0, -1, -2, . . . $(-l)$
Bilangan kuantum spin	s	$+1/2$, $-1/2$

Bagi n dan l, biasanya dipergunakan abjad di bawah bilangan yang bersangkutan. Bagi setiap keadaan yang dinyatakan oleh empat bilangan kuantum ini, hanya satu elektron dapat dimasukkan (Prinsip Eksklusi Pauli). Jadi, kulit K dapat menampung dua elektron, sedangkan kulit L, M dan N menampung masing-masing 8, 18 dan 32 elektron.

Tabel 4.1 menunjukkan konfigurasi elektron dari setiap unsur. Elektron dalam orbitals (bilangan kuantum azimutal $l=0$) mempunyai distribusi ruang yang simetri berbentuk bola (Gb. 4.1). Orbital p, d dan f mempunyai karakteristik tersendiri yang sangat berbeda dari orbital s. Orbital elektron ini mempunyai karakteristik arah tersendiri yang sangat penting bagi ikatan antar atom.

1.1.2 Sifat ikatan antar atom dan klasifikasinya

Apabila satu atom terpisah jauh dari atom lainnya, setiap atom mempunyai distribusi orbital elektronnya sebagai satu atom bebas. Tetapi apabila mereka didekatkan satu sama lain, terjadi perubahan pada elektron luarnya. Satu elektron dapat menjadi kepunyaan bersama dari dua atom, atau satu elektron dapat berpindah dari satu atom ke atom lain. Akibatnya, terjadi gaya tarik menarik antara atom-atom itu, maka terbentuklah ikatan kimia. Ikatan kimia dapat dibagi menjadi beberapa jenis yang akan dijelaskan di bawah ini. Sifat-sifat bahan sangat tergantung pada jenis ikatan kimianya. Tetapi sering bahwa ikatan sebenarnya merupakan keadaan antara

Tabel 4.1 Konfigurasi elektron dan unsur pada keadaan dasar.

No.	Atom unsur berkala		*K*	*L*		*M*			*N*				*O*				*P*			*Q*
			1*s*	2*s*	2*p*	3*s*	3*p*	3*d*	4*s*	4*p*	4*d*	4*f*	5*s*	5*p*	5*d*	5*f*	6*s*	6*p*	6*d*	7*s*
1	H	1	1																	
	He	2	2																	
	Li	3	2	1																
	Be	4	2	2																
	B	5	2	2	1															
	C	6	2	2	2															
	N	7	2	2	3															
	O	8	2	2	4															
	F	9	2	2	5															
	Ne	10	2	2	6															
3	Na	11	2	2	6	1														
	Mg	12	2	2	6	2														
	Al	13	3	2	6	2	1													
	Si	14	2	2	6	2	2													
	P	15	2	2	6	2	3													
	S	16	2	2	6	2	4													
	Cl	17	2	2	6	2	5													
	Ar	18	2	2	6	2	6													
4	K	19	2	2	6	2	6		1											
	Ca	20	2	2	6	2	6		2											
	Sc	21*	2	2	6	2	6	1	2											
	Ti	22*	2	2	6	2	6	2	2											
	V	23*	2	2	6	2	6	3	2											
	Cr	24*	2	2	6	2	6	5	1											
	Mn	25*	2	2	6	2	6	5	2											
	Fe	26*	2	2	6	2	6	6	2											
	Co	27*	2	2	6	2	6	7	2											
	Ni	28*	2	2	6	2	6	8	2											
	Cu	29*	2	2	6	2	6	10	1											
	Zn	30*	2	2	6	2	6	10	2											
	Gn	31	2	2	6	2	6	10	2	1										
	Ge	32	2	2	6	2	6	10	2	2										
	As	33	2	2	6	2	6	10	2	3										
	Se	34	2	2	6	2	6	10	2	4										
	Br	35	2	2	6	2	6	10	2	5										
	Kr	36	2	2	6	2	6	10	2	6										
5	Rb	37	2	2	6	2	6	10	2	6			1							
	Sr	38	2	2	6	2	6	10	2	6			2							
	Y	39*	2	2	6	2	6	10	2	6	1		2							
	Zr	40*	2	2	6	2	6	10	2	6	2		2							
	Nb	41*	2	2	6	2	6	10	2	6	4		1							
	Mo	42*	2	2	6	2	6	10	2	6	5		1							
	Tc	43*	2	2	6	2	6	10	2	6	(5)		(2)							
	Ru	44*	2	2	6	2	6	10	2	6	7		1							
	Rh	45*	2	2	6	2	6	10	2	6	8		1							
	Pd	46*	2	2	6	2	6	10	2	6	10									
	Ag	47*	2	2	6	2	6	10	2	6	10		1							
	Cd	48*	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2							
	In	49	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	1						
	Sn	50	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	2						
	Sb	51	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	3						
	Te	52	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	4						
	I	53	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	5						
	Xe	54	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6						

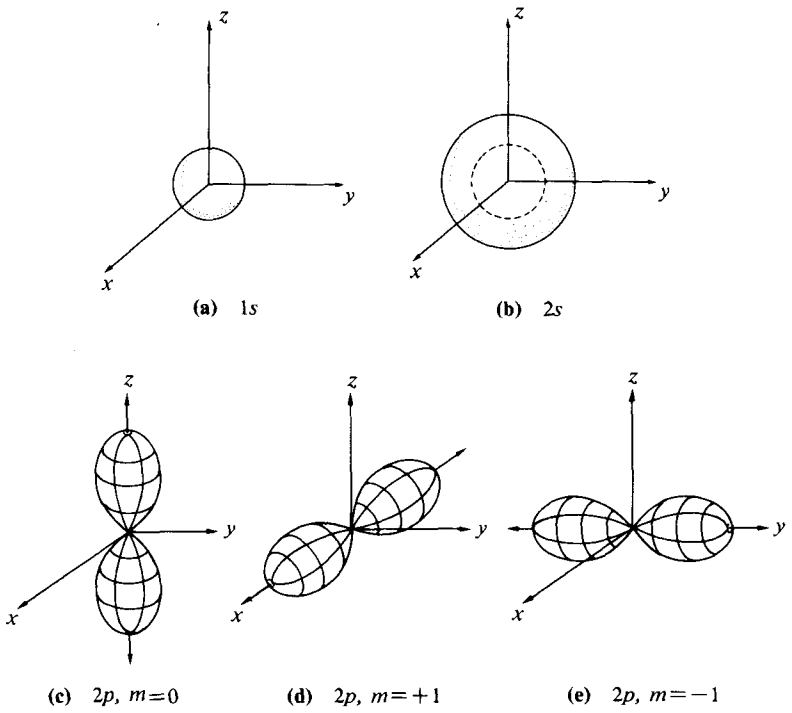
Tabel 4.1 Konfigurasi elektron dan unsur pada keadaan dasar.

No. Atom unsur berkala		*K*	*L*		*M*			*N*				*O*				*P*			*Q*
		1*s*	2*s*	2*p*	3*s*	3*p*	3*d*	4*s*	4*p*	4*d*	4*f*	5*s*	5*p*	5*d*	5*f*	6*s*	6*p*	6*d*	7*s*
6 Cs	55	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			1			
Ba	56	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6			2			
La	57*	2	2	6	2	6	10	2	6	10		2	6	1		2			
Ce	58†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(2)	2	6			(2)			
Pr	59†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(3)	2	6			(2)			
Nd	60†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(4)	2	6			(2)			
Pm	61†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(5)	2	6			(2)			
Sm	62†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	6	2	6			2			
Eu	63†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	7	2	6			2			
Gd	64†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(7)	2	6	(1)		2			
Tb	65†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(8)	2	6	(1)		2			
Dy	66†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(10)	2	6			(2)			
Ho	67†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(11)	2	6			(2)			
Er	68†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	(12)	2	6			(2)			
Tm	69†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	13	2	6			2			
Yb	70†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6			2			
Lu	71†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	1		2			
Hf	72*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	2		2			
Ta	73*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	3		2			
W	74*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	4		2			
Re	75*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	5		2			
Os	76*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	6		2			
Ir	77*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	7		2			
Pt	78*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	9		1			
Au	79*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		1			
Hg	80*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2			
Tl	81	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	1		
Pb	82	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	2		
Bi	83	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	3		
Po	84	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	4		
At	85	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	5		
Rn	86	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		
7 Fr	87	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		1
Ra	88	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6		2
Ac	89*	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	(1)	(2)
Th	90†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10		2	6	(2)	(2)
Pa	91†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	2	2	6	(1)	(2)
U	92†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	3	2	6	(1)	(2)
Np	93†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(5)	2	6		
Pu	94†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(6)	2	6		
Am	95†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6		
Cm	96†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	7	2	6	(1)	(2)
Bk	97†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(7)	2	6	(2)	(2)
Cf	98†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(9)	2	6	(1)	(2)
Es	99†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(10)	2	6	(1)	(2)
Fm	100†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(11)	2	6	(1)	(2)
Md	101†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(12)	2	6	(1)	(2)
No	102†	2	2	6	2	6	10	2	6	10	14	2	6	10	(13)	2	6	(1)	(2)

*Unsur transisi

†Lantalid dan aktinid

Beberapa dari unsur ini tidak menentu konfigurasi elektronnya.



Gb. 4.1 Distribusi ruang dari orbital elektron.

(1) Ikatan ion

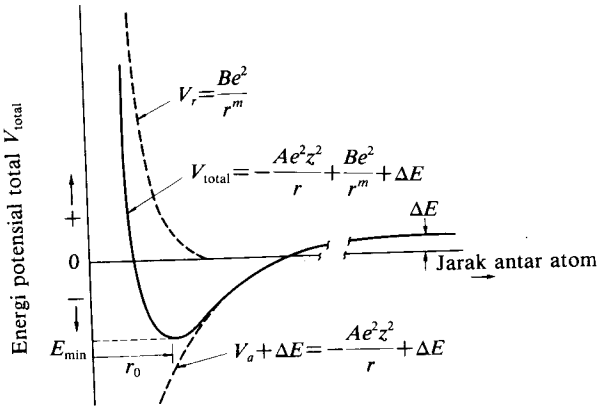
Ikatan ion disebabkan oleh gaya tarik menarik elektrostatik, yang terjadi antara ion positip dan ion negatip, sebagai akibat dari kehilangan atau bertambahnya elektron pada atom. Kekuatan ikatan (tarik menarik Coulomb) berbanding terbalik dengan kuadrat jarak (r) antara ion, dan berbanding lurus dengan perkalian muatan listriknya. Kalau kedua ion berdekatan dan terjadi antaraksi orbital elektronnya, maka terjadi gaya tolak yang kuat antara mereka. Jadi, energi potensial total dari suatu kristal dinyatakan oleh jumlah dari energi potensial antara semua pasangan ion dalam kristal, yang dinyatakan sebagai berikut:

$$V_{\text{total}}=\frac{Ae^2z^2}{r}+\frac{Be^2}{r^m}+\Delta E$$

di mana A adalah konstanta Madelung yang ditentukan oleh struktur kristal (NaCl: 1,7476, CaF_2: 5,0388) dan ΔE adalah perbedaan antara energi ionisasi dari kation dan afinitas elektron dari anion. Seperti dinyatakan dalam Gb. 4.2, kurva energi potensial mempunyai minimum pada r_0, yang menyatakan jarak antara ion pada nol derajat Kelvin.

Tarik menarik elektrostatik tidak mempunyai arah tertentu. Kation dan anion cenderung untuk dikelilingi oleh sebanyak mungkin ion dari muatan yang berlawanan. Konfigurasi ion dalam kristal ion ditentukan oleh perbandingan dari radius ionnya.

Tarik menarik elektrostatiknya kuat, maka kristal ion umumnya keras dan getas dan memiliki titik cair serta titik didih yang tinggi. Konduktivitas listrik dari kristal ion sangat rendah, karena ion dalam kristal tidak dapat bergerak bebas. Kalau berfusi, bahan menjadi konduktor listrik.



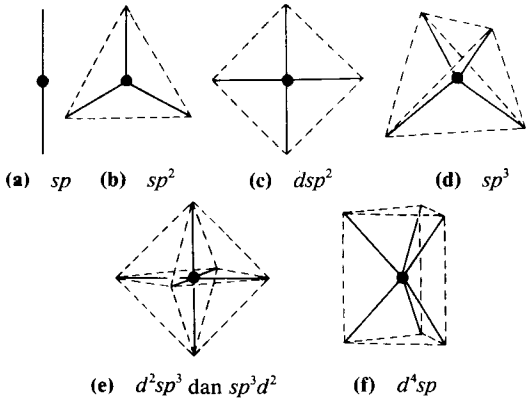
Gb. 4.2 Energi potensial total dari kristal ion.

(2) Ikatan kovalen

Pada H_2 atau I_2, atom molekul dari pasangan terikat masing-masing memakai bersama dua elektron dan membentuk konfigurasi elektron dari gas mulia seperti pada He dan Ar. Ikatan atom yang memakai bersama elektron tersebut dinamakan ikatan kovalen.

Ikatan kovalen ditentukan oleh pengarahan yang kuat karena terbentuk oleh saling tumpuknya orbital elektron, yang dibentuk oleh orbital *s*. Sebagai contoh, karbon ($1s^2 2s^2 2p^2$) menyusun empat ikatan kovalen yang sama kuat (metan dan intan). Hal ini disebabkan oleh empat orbital yang sama kuat. Mereka terbentuk oleh empat orbital setengah penuh dari satu 2*s* dan tiga 2*p* kalau satu elektron dari 2*s* memasuki 2*p*. Orbital yang dibentuk dengan jalan ini dinamakan orbital hibrida. Dalam contoh di atas orbital tersebut dinamakan orbital hibrida sp^3, karena terdiri dari satu orbital *s* dan orbital *p*. Empat orbital hibrida pada masing-masing titik tetrahedron (Gb. 4.3). Pada Gb. 4.3 ditunjukkan beberapa contoh mengenai orbital hibrida.

Hanya sedikit jenis kristal yang memiliki ikatan kovalen seluruhnya. Contoh khas adalah pada intan. Kristal SiC dan Si_3N_4 juga memiliki ikatan kovalen. Ikatan kovalen memberikan sifat yang mengarah pada kekuatan kristal dan struktur kristalnya tidak sesederhana seperti halnya pada kristal dengan ikatan logam atau



(a) *sp*-lurus
(b) sp^2-orto-trigonal
(c) dsp^2-orto tetragonal
(d) sp^3-orto tetrahedral
(e) d^2sp^3-dan sp^3d^2 orto oktahedral
(f) d^4sp-trihedral

Gb. 4.3 Konfigurasi ikatan berhubungan dengan orbital hibrida sederhana.

ikatan ion, di mana struktur kristalnya dapat digambarkan sebagai bola-bola dengan susunan rapat. Ikatan kovalen sangat kuat sehingga kristal bersifat sangat keras dan mempunyai titik cair serta titik didih yang tinggi di samping itu kristal tersebut mempunyai sifat isolasi listrik.

(3) Ikatan logam

Dalam menjelaskan ikatan logam diperlukan uraian yang teliti mengenai tingkat energi yang dimiliki elektron melalui mekanika kuantum. Secara intuisi dan mudah dimengerti, Drude Lorentz pada permulaan abad ke 20 mengusulkan suatu model. Dengan model tersebut, seseorang dapat menjelaskan banyak hal mengenai sifat-sifat kristal, dan juga dapat menjelaskan mengenai ikatan logam sebagai pendekatan pertama. Model ini menjelaskan bahwa sebagian elektron luar menjauhi atom membentuk awan elektron tersebar ke seluruh kristal. Suatu logam dapat dikatakan sebagai bahan terdiri dari kation tercelup dalam awan elekton, dan gaya tarik menarik antara kation dan awan elektron ini merupakan gaya kohesi. Dalam kristal logam tidak ada faktor pembatas, sebagai contoh, jumlah dan arah ikatan pada ikatan kristal kovalen dan kenetralan listrik pada kristal ion. Banyak logam mempunyai salah satu susunan kristal dari dua macam susunan rapat, di mana atom-atom tersusun secara rapat. Hal ini memberikan penjelasan mengapa logam memiliki masa jenis tinggi dan memiliki sifat liat serta mudah ditempa. Hantaran listrik dan panas yang baik pada logam, dapat dimengerti dari mudahnya pergerakan elektron.

(4) Ikatan dipol

Ikatan yang jauh lebih lemah dari ketiga jenis ikatan yang dijelaskan di atas adalah ikatan dipol, yaitu ikatan yang disebabkan gaya tarik menarik elektrostatik dari molekul dipol atau gugus atom.

Molekul yang terbentuk oleh ikatan kovalen sering berupa dipol yang permanen, karena elektron berada di tengah antara atom terikat, dan muatan positif serta muatan negatifnya terdistribusi tidak merata. Molekul saling menarik secara elektrostatik antara ujung positip dan ujung negatip sehingga terjadi suatu ikatan. Ikatan dipol dari atom hidrogen sebagai ujung positip disebut ikatan hidrogen yang merupakan ikatan cukup kuat karena kecilnya radius ion hidrogen itu. Ikatan dipol permanen juga mempunyai sifat mengarah.

Ada juga ikatan yang disebut ikatan dipol berfluktuasi yang tidak mempunyai sifat mengarah. Hal ini terjadi karena pada setiap saat terdapat elektron lebih banyak di satu sisi dari inti atom dari pada di sisi lainnya. Ikatan ini dinamakan ikatan van der Waals, yang ikatannya lebih lemah satu tingkat dari pada ikatan hidrogen.

(5) Ikatan antar atom dan sifat-sifat kristal

Empat jenis gaya antar atom yang utama serta sifat-sifatnya, di atas telah diutarakan secara singkat, yang diperbandingkan satu sama lain pada Tabel 4.2. Perbedaan antara ikatan-ikatan tersebut tidak begitu jelas. Pada kenyataan ada satu contoh kristal di mana ikatannya memiliki sifat antara dan yang lain memiliki lebih dari satu jenis ikatan yang bekerja bersama.

Kebanyakan bahan pembentuk keramik memiliki ikatan ion, ikatan kovalen dan ikatan antara. Sebagai misal, bagian ikatan ion dalam sistem Mg–O, Al–O, Zn–O dan Si–O dapat dikatakan masing-masing 70%, 60%, 60% dan 50%. Yang sangat menarik adalah bahwa pada ReO_3, V_2O_3 dan TiO, yang merupakan oksida dan tidak pernah menunjukkan sifat liat atau dapat dideformasikan, tetapi memiliki hantaran listrik yang relatif dapat disamakan dengan logam biasa.

Tabel 4.2 Empat ikatan antar atom yang utama dan sifat-sifatnya.

Sifat-sifat	Ikatan ion	Ikatan kovalen	Ikatan logam	Ikatan van der Waals
Struktur	Tidak mengarah. Mempunyai bilangan koordinasi tinggi.	Mempunyai keterarahan khusus. Jumlah ikatan terbatas, Bilangan koordinasi lebih kecil dan masa jenis rendah.	Tidak mengarah. Memiliki bilangan koordinasi tinggi dan masa jenis tinggi.	Strukturnya serupa seperti pada ikatan logam.
Mekanik	Kuat dan keras.	Kuat dan keras.	Kekuatan bervariasi. Liat dan mudah ditempa.	Lemah dan lunak.
Termal	Titik cair cukup tinggi. Koefisien muai rendah. Diionisasi pada fusi.	Titik cair tinggi. Koefisien muai rendah. Pada fusi terjadi molekul.	Titik cair bervariasi. Cair dalam daerah temperatur yang luas.	Titik cair rendah. Koefisien muai besar.
Listrik	Isolator baik. Hantaran listrik waktu berfusi karena perpindahan ion. Kadang-kadang larut dalam cairan yang mempunyai konstanta dielektrik tinggi.	Isolator dalam keadaan padat dan fusi.	Hantaran listrik karena perpindahan elektron.	Isolator.
Optik	Absorpsi dan sifat lainnya serupa seperti dalam larutan, karena sifatnya terutama dimiliki oleh masing-masing ion.	Indeks bias tinggi. Absorpsi dalam larutan berbeda banyak daripada dalam gas.	Tidak tembus cahaya. Sifatnya serupa seperti dalam keadaan cair.	Sifat-sifat serupa seperti dalam larutan dan gas, karena sifat ini dimiliki atom masing-masing.

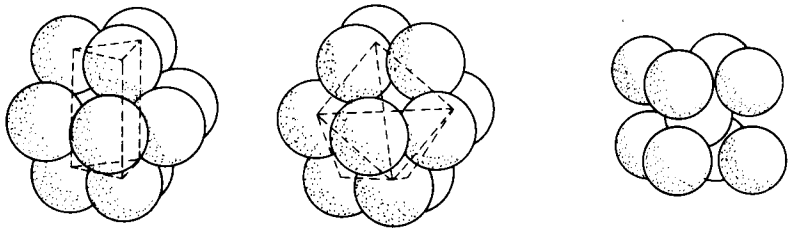
1.2 Struktur kristal

Susunan atom dalam benda padat dapat diperkirakan kalau diketahui apakah ikatan antar atomnya memiliki sifat keterarahan atau tidak. Atom-atom diikat oleh ikatan mengarah (ikatan kovalen, ikatan dipol permanen) berderet dalam satu aturan tertentu untuk memenuhi sudut valensi. Kalau ikatannya bukan ikatan mengarah (ikatan logam, ikatan ion, ikatan van der Waals), maka atom-atom berkelakuan seperti bola kaku dan membentuk susunan mengikuti bentuk geometri tertentu yang ditentukan oleh perbandingan dimensi relatifnya. Dalam kristal senyawa anorganik yang rumit sifat alamiah ikatan antar atomnya tidak dapat terlihat jelas ciri khasnya, antara ikatan kovalen dan ikatan ion. Selanjutnya dalam beberapa kasus berbagai jenis ikatan dapat bekerja pada satu kristal. Dalam hal ini perlu dicatat bahwa berbagai struktur kristal yang dikemukakan di bawah ini dikelompokkan oleh gaya utama yang bekerja pada ikatannya.

1.2.1 Ikatan tidak mengarah dan struktur ion sederhana

Atom-atom tersusun serapat mungkin dalam bentuk padat membentuk satu zat tunggal berupa logam atau unsur tanah jarang. Jumlah ikatan per satuan volum menjadi maksimum sedangkan energi ikatan per satuan volum menjadi minimum. Struktur kristal yang terbentuk merupakan suatu bentuk geometri dalam ruang di mana atom dianggap sebagai bola kaku yang mempunyai ukuran sama.

Jumlah atom maksimum, yang dapat disusun di sekeliling satu atom bersentuhan



(a) **Heksagonal susunan rapat (*hcp*)** (b) **Kubus susunan rapat (*cpp*) atau kubus terpusat muka (*fcc*)** (c) **Kubus terpusat bahan (*bcc*)**

Gb. 4.4 Susunan bola yang berjari-jari sama.

dengan semua atom tersebut, adalah 12. Ada dua bentuk susunan tersebut yaitu heksagonal susunan rapat (*hcp*) dan kubus susunan rapat (*ccp*) atau kubus terpusat muka (*fcc*), yang dijelaskan pada Gb. 4.4 masing-masing (a) dan (b). Dua pertiga dari logam dan semua unsur jarang mempunyai struktur hcp atau *fcc* pada temperatur kamar. Kebanyakan logam yang tidak mempunyai struktur susunan rapat adalah logam alkali (Na, K, dsb), dan logam transisi (Fe, Cr, W, dsb). Semua itu mempunyai struktur kubus terpusat badan (*bcc*), seperti ditunjukkan pada Gb. 4.4 (c). Kerapatan susunan pada bcc agak lebih rendah daripada kerapatan pada hcp dan fcc.

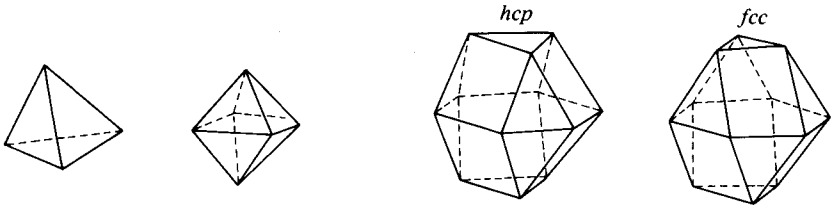
Kalau ukuran atom berbeda, atom yang memiliki ikatan tak mengarah tidak dapat dijelaskan struktur kristalnya dengan cara yang dikemukakan di atas. Ukuran ion dari kation dan anion biasanya berbeda, dan bentuk susunan ditentukan juga oleh ukuran relatifnya. Kalau ion unsur A mengelilingi ion unsur C yang mempunyai ukuran lebih kecil, banyak ion A disebut bilangan koordinasi ion C. Daerah bilangan koordinasi dan perbandingan radius ion dari ion A dan C, untuk mana bentuk susunan atom stabil pada bilangan koordinasi tertentu, dapat diperoleh dengan perhitungan geometri di bawah ini dengan asumsi kondisi sebagai berikut:

1) Kation dan anion ada pada jarak keseimbangan antar ion (bola bersinggungan)
2) Anion tidak saling tumpuk
3) Setiap kation dikelilingi oleh anion sebanyak mungkin (Tabel 4.3)

Suatu polihedron yang dibuat dengan menghubungkan titik-titik pusat anion dengan titik pusat kation, disebut polihedron anion atau lebih umum disebut polihedron koordinasi. Polihedron koordinasi pada struktur susunan rapat adalah tetrahedron, oktahedron, oktahedron kubus kembar dan oktahedron kubus (Gb. 4.5). Posisi yang dapat dimasuki disebut tempat tetrahedral, tempat oktahedral, dst.

Tabel 4.3 Bilangan koordinasi yang dihitung sebagai fungsi perbandingan diameter ion.

Bilangan koordinasi	Perbandingan diameter untuk koordinasi seimbang	Bentuk koordinasi Polihedron koordinasi	Susunan
2	0–0,155	Lurus	Lurus
3	0,155–0,225	Segitiga	Prisma trigonal
4	0,225–0,414	Tetrahedron	Tetrahedral
6	0,414–0,732	Oktahedron	Oktahedral
8	0,732–1,0	Heksahedron	Kubus
12	1,0		*hcp*
12	1,0		*fcc*



Gb. 4.5 Polihedron terkoordinasi.

Ukuran berbagai ion (radius ion) dalam struktur ion ditentukan secara setengah empirik dari panjang ikatan antar-atom yang diamati dari kristal sebenarnya (Tabel 4.4). Radius ion tak perlu mempunyai harga tertentu, tetapi biasanya tetap untuk ion yang bersangkutan. Di bawah ini dikemukakan struktur khas kristal ion yang sering ditemui dalam keramik.

(1) Jenis struktur kristal garam batu

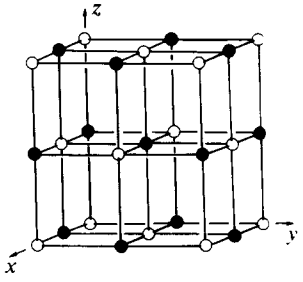
Gb. 4.6 menunjukkan struktur kristal garam batu (NaCl). Anion besar tersusun dalam bentuk kubus dan semua tempat interstisi dari koordinasi lipat 6 terisi oleh kation. Sejumlah besar senyawa mempunyai struktur seperti itu, sebagai contoh: MgO, CaO, MnO, NiO, TiC, ZrC, TiN, ZrN, dsb.

(2) Struktur sesium klorida

Pada struktur CsCl, CsBr dan CsI, atom menempati tempat di tengah-tengah kubus berupa struktur bcc terbentuk oleh atom isomer. Kation dan anion keduanya dalam koordinasi lipat 8.

(3) Struktur wurtzit

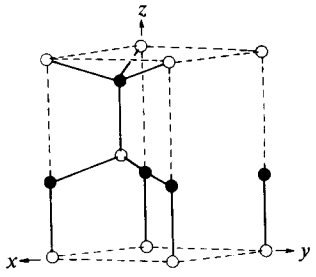
Struktur ini mempunyai susunan heksagonal dari anion, dan setengah dari interstisi tetrahedral diisi oleh kation kecil (Gb. 4.7). Senyawa yang memiliki struktur ini adalah BeO, ZnO, α-SiC, AlN, GaN, InN, dsb.



●: Na atau Cl

○: Cl atau Na

Gb. 4.6 Struktur kubus sel satuan NaCl.



●: Zn atau S

○: S atau Zn

Gb. 4.7 Struktur heksagonal Wurtzit (ZnS) dalam sel satuan.

Tabel 4.4 Radius ion.

(1) Bilangan koordinasi=6, dalam Å Unsur khas, dan unsur transisi

	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	0
1							H^- 1,54		He –
2	Li^+ 0,60	Be^{2+} 0,31	B –	C –	N –	O^{2-} 1,40	F^- 1,36		Ne –
3	Na^+ 0,95	Mg^{2+} 0,65	Al^{3+} 0,50	Si^{4+} 0,41	P –	S^{2-} 1,84	Cl^- 1,81		Ar –
4	K^+ 1,33	Ca^{2+} 0,99	Sc^{3+} 0,81	Ti^{3+} 0,76 Ti^{4+} 0,68	V^{2+} 0,88 V^{3+} 0,74 V^{4+} 0,60	Cr^{2+} 0,84 Cr^{3+} 0,63 Cr^{4+} 0,56	Mn^{2+} 0,80 Mn^{3+} 0,66 Mn^{4+} 0,54	Fe^{2+}0,80 Co^{2+}0,72 Ni^{2+}0,69 Fe^{3+}0,64 Co^{3+}0,63 Ni^{3+}0,62	
	Cu^+ 0,96	Zn^{2+} 0,74	Ga^{3+} 0,62	Ge^{4+} 0,53	As –	Se^{2-} 1,98	Br^- 1,95		Kr –
5	Rb^+ 1,48	Sr^{2+} 1,13	Y^{3+} 0,93	Zr^{4+} 0,80	Nb –	Mo –	Tc –	Ru^{4+}0,63 Rh^{3+}0,68 Pd^{2+}0,80 Pd^{4+}0,65	
	Ag^+ 1,26	Cd^{2+} 0,97	In^{3+} 0,81	Sn^{4+} 0,71	Sb –	Te^{2-} 2,21	I^- 2,16		Xe –
6	Cs^+ 1,69	Ba^{2+} 1,35	La^{3+} 1,15	Hf^{4+} 0,78	Ta –	W^{4+} 0,66	Re^{4+} 0,72	Os^{4+}0,65 Ir^{4+}0,64 Pt^{4+}0,65	
	Au^+ 1,37	Hg^{2+} 1,10	Tl^+ 1,44 Tl^{3+} 0,95	Pb^{2+} 1,21 Pb^{4+} 0,84	Bi –	Po –	At –		Rn –
7	Fr^+ 1,76	Ra^{2+} 1,43	Ac^{3+} 1,11						

Lantanid

Ce^{3+}1,02 Pr^{3+} 1,00 Nd^{3+}0,99 Pm^{3+}0,98 Sm^{3+}0,97 Eu^{3+}0,97 Gd^{3+}0,97
Tb^{3+}1,00 Dy^{3+}0,99 Ho^{3+}0,97 Er^{3+}0,96 Tm^{3+}0,95 Yb^{3+}0,94 Lu^{3+}0,93

Actinides

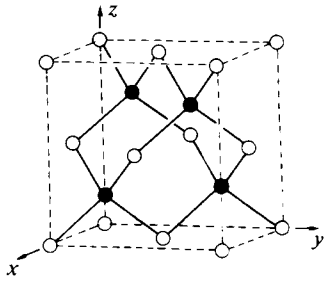
Th^{3+}1,08 Pa^{3+}1,06 U^{3+}1,04 Np^{3+}1,02 Pu^{3+}1,01 Am^{3+}1,00 NH_4^+1,48 OH^-1,53
Th^{4+}0,95 Pa^{4+}0,91 U^{4+}0,89 Np^{4+}0,88 Pu^{4+}0,86 Am^{4+}0,85

(2) Bilangan koordinasi=4, dalam Å

Ag^{1+}	Al^{3+}	As^{5+}	B^{3+}	Be^{2+}	C^{4+}
1,02	0,39	0,34	0,12	0,27	0,15
Cd^{2+}	Cr^{4+}	Cu^{2+}	F^{1-}	Fe^{2+}	Fe^{3+}
0,84	0,44	0,63	1,31	0,63	0,49
Ga^{3+}	Ge^{4+}	Hg^{2+}	Li^{1+}	Mg^{2+}	N^{5+}
0,47	0,40	0,96	0,59	0,49	0,13
Na^{1+}	Nb^{5+}	O^{2-}	P^{5+}	Pb^{2+}	S^{6+}
0,99	0,32	1,38	0,33	0,94	0,12
Se^{6+}	Si^{4+}	V^{5+}	W^{6+}	Zn^{2+}	
0,29	0,26	0,36	0,41	0,60	

(4) Struktur paduan seng blen

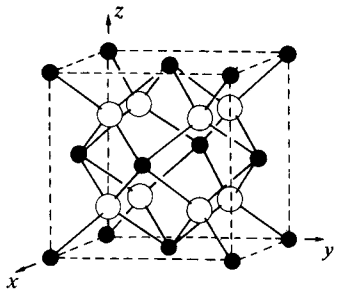
Struktur lain yang mempunyai koordinasi tetrahedral adalah struktur seng blen. Dalam struktur ini setengah dari interstisi tetrahedral dalam kubus susunan rapat dari anion diisi oleh kation kecil (Gb. 4.8). Senyawa II-IV termasuk β-ZnS, SnSe, ZnTe, CdS, CdSe, CdTe, dst, dan senyawa III-V termasuk AlP, AlSb, GaP, GaAs, GaSb, InP, InSb, BN kubus, dsb., mempunyai struktur seperti ini.



●: Zn atau S

○: X atau Zn

Gb. 4.8 Struktur kubus dari Seng blen (ZnS) dalam sel satuan.



●: Ca, ○: F

Gb. 4.9 Struktur kubus fluorit (CaF_2) dalam sel satuan.

(5) Struktur rutil

Rutil (TiO_2) mempunyai struktur satuan sedikit terdistorsi dari oktahedron TiO_6 yang terbentuk oleh enam ion oksigen, tengah-tengahnya ditempati oleh Ti^{4+}. Kation mengisi hanya sebagian tempat oktahedral yang tersedia. Struktur ini dimiliki oleh GeO_2, PbO_2, SrO_2, MnO_2, MoO_2, NbO_2, TeO_2, TiO_2, VO_2, WO_2 dan beberapa oksida lainnya, demikian juga ZrF_2, MgF_2 CoF_2 dan kristal fluorida lainnya.

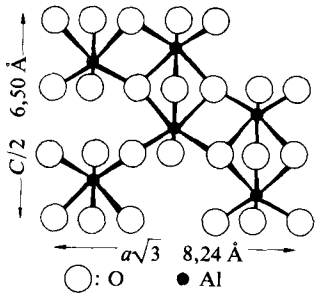
(6) Struktur fluorit

Fluorit, CaF_2, mempunyai struktur berdasarkan susunan kubus terpusat muka (*fcc*) dari Ca^{2+}. Sel satuan terbagi menjadi delapan kubus kecil dan ion F^- menempati titik tengah setiap kubus (Gb. 4.9). Ion Ca^{2+} mempunyai koordinasi lipat 8, dan ion F^- mengisi setengah tempat yang tersedia mempunyai koordinasi lipat 4. Struktur ini dimiliki juga oleh fluorit Pb dan Hg, satu jenis dari polimorf ZrO_2 atau HfO_2 juga CeO_2, ThO_2, UO_2, dst.

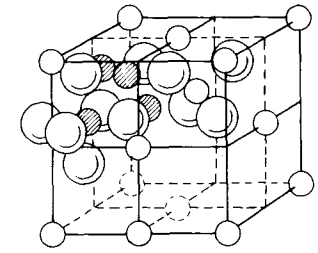
Struktur serupa seperti fluorit tetapi dengan ion oksigen yang menempati tempat titik pusat muka kubus dinamakan struktur antifluorit. Struktur ini ditemukan pada Li_2O, Na_2O, K_2O, dsb.

(7) Struktur α-alumina, struktur ilmenit

Dalam struktur kristal α-alumina, ion oksigen tersusun dalam heksagonal susunan rapat, dan ion Al^{3+} mengisi dua pertiga dari tempat terkoordinasi lipat 6 dalam lapisan susunan rapat (Gb. 4.10). Struktur ini merupakan struktur khusus di mana sebagian oktahedron AlO_6 memberikan bidang-bidangnya. Senyawa yang memiliki struktur tersebut adalah α-Fe_2O_3, Cr_2O_3, Co_2O_3, α-Ga_2O_3, Ti_2O_3, V_2O_3, Rh_2O_3, dsb.



Gb. 4.10 Struktur α-Alumina (α-Al_2O_3).



○ Oksigen
▨ Kation dalam tempat oktahedral
○ Kation dalam tempat tetrahedral

Gb. 4.11 Struktur spinel.

Selanjutnya, senyawa yang memiliki dua macam kation menempati tempat ion Al^{3+} yang bersangkutan dalam struktur α-alumina, yaitu jenis struktur ABO_3 (A dan B adalah unsur yang berbeda), dinamakan struktur ilmenit. Senyawa yang memiliki struktur ilmenit ini ialah $FeTiO_3$, $MgTiO_3$, $MnTiO_3$, $CoTiO_3$, $NiTiO_3$, dsb.

(8) Struktur spinel

Dalam struktur spinel (Gb. 4.11) susunan atom oksigen merupakan kubus susunan rapat. Seperdelapan dari tempat tetrahedral terbentuk dalam lapisan susunan rapat dari ion O^{2-} diisi oleh kation divalensi dan setengah dari tempat oktahedral diisi oleh kation trivalensi. Satu sel satuan memuat delapan satuan kimia dari atom-atom. Rumus kimia dari senyawa yang memiliki struktur spinel dinyatakan oleh AB_2O_4 di mana:

1) Ion A mengisi tempat terahedral dan ion B mengisi tempat oktahedral atau
2) Setengah dari ion B mengisi tempat tetrahedral, sisa ion B dan ion A mengisi tempat oktahedral.

Yang pertama ($A^{IV}B_2^{VI}O_4$) disebut struktur spinel normal dan yang terakhir ($B^{IV}(AB)^{VI}O_4$) dinamakan kebalikan struktur spinel, atau struktur spinel terbalik.

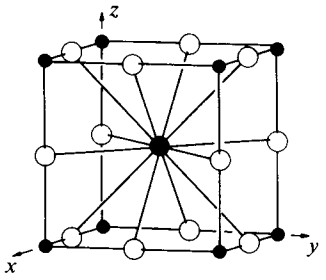
Struktur spinel normal terdapat dalam senyawa $ZnFe_2O_4$, $CdFe_2O_4$, $MgAl_2O_4$, $FeAl_2O_4$, $CoAl_2O_4$, $NiAl_2O_3$, $MnAl_2O_4$, $ZnAl_2O_4$ dsb, sedangkan struktur spinel terbalik terdapat dalam ferit termasuk Fe $(MgGe)O_4$, $Fe(TiFe)O_4$, Fe_3O_4, $Zn(SnZn)O_4$, $Fe(NiFe)O_4$, dsb.

(9) Struktur perovskit

Struktur yang diutarakan di atas didasarkan hanya kepada susunan rapat ion oksigen. Tetapi dalam struktur perovskit, sebagian kation berpartisipasi dalam struktur susunan rapat. Dalam perovskit, ion O^{2-} dan O^{2-} membentuk struktur kubus susunan rapat, dan yang kecil, ion Ti^{4+} yang bermuatan tinggi menempati tempat interstisi oktahedral (Gb. 4.12). Untuk senyawa ABO_3, agar memiliki struktur perovskit, pembatasan berikut diperlukan pada radius ion dari atom. Yaitu dengan mempunyai radius ion r_A, r_B, r_0 dari atom penyusun,

$$r_A + r_0 = t\sqrt{2}(r_B + r_0)$$

Struktur didapat kalau harga t (faktor yang dibolehkan) adalah 0,77–1,0. Kalau t lebih



●: Ti, ●: Ca, ○: O

Gb. 4.12 Struktur kubus (diidealkan) dari perovskit ($CaTiO_3$) dalam sel satuan.

kecil dari 0,77, maka terbentuk struktur ilmenit yang telah dikemukakan.

Struktur ini ditemukan dalam senyawa $BaTiO_3$, $SrTiO_3$, $CaZrO_3$, $KNBO_3$, $NaNBO_3$, $LaAlO_3$, $YAlO_3$, $KMgF_3$, dsb.

1.2.2 Ikatan terarah dan struktur kovalen sederhana

Jumlah atom yang berdekatan terikat secara kovalen dengan atom tertentu, dibatasi oleh valensi kovalen dari atom tersebut. Valensi kovalen itu biasanya kecil, kebanyakan struktur kovalen adalah dari kristal molekular, di mana ikatan kovalen terdapat hanya pada molekul yang bersangkutan, tetapi molekul-molekulnya sendiri masing-masing terikat oleh ikatan dipol, yang berbeda dengan ikatan kovalen. Banyak senyawa organik memiliki jenis struktur ini, Tetapi banyak struktur yang ikatan seluruhnya didasarkan pada ikatan kovalen. Pada umumnya struktur kovalen mempunyai ikatan lebih kuat dibandingkan dengan struktur dengan ikatan ion, dan senyawa dari struktur ini lebih stabil dan lebih kuat pada temperatur tinggi. Jumlah atom pada satuan volum lebih sedikit dibandingkan pada struktur susunan rapat karena ikatannya yang terarah dengan demikian massa jenisnya lebih rendah.

Jarak ikatan antar atom bagi ikatan kovalen berbeda dengan pada ikatan ion. Ini dinamakan radius ikatan kovalen dari atom-atom, berubah sedikit untuk koordinasi tetrahedral dan oktahedral, dan bentuk orbital hibrida juga berubah.

Struktur kovalen yang khas dikemukakan di bawah ini:

(1) Struktur intan

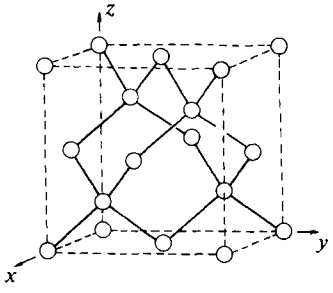
Unsur-unsur ringan dalam kelompok IV seperti intan (C), Si, Ge, timah kelabu, dst., memiliki struktur intan seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.13. Dalam struktur ini setiap atom diikat oleh saling tumpangnya orbital hibrida sp^3 dan diikat pada arah puncak oktahedron.

(2) Struktur grafit

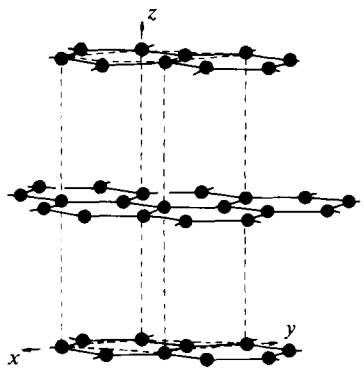
Grafit adalah satu dari polimorf kristal karbon. Atom karbon membentuk lapisan susunan rapat ikatan kovalen, yang diikat dengan ikatan π lemah di antaranya (Gb. 4.14). Lapisan atas susunan padat dari ikatan kovalen terbentuk oleh orbital hibrida sp^2.

1.2.3 Campuran ikatan kristal rumit

Dalam kristal yang rumit, berbagai macam atom berperan dan ikatannya merupakan ikatan campuran dalam banyak hal. Struktur kristal demikian dapat dimengerti apabila mengingat bahwa kristal tersusun oleh kombinasi dari polihedron koordinasi, di mana satuan kecil dari kation dikelilingi oleh beberapa anion. Salah



Gb. 4.13 Struktur kubus dari intan (C) dalam sel satuan.



Gb. 4.14 Struktur heksagonal dari grafit. Garis titik-titik menyatakan sel satuan.

satu contoh adalah silikat yang merupakan bahan baku penting bagi keramik.

Struktur dasar dari silikat adalah tetrahedron $(SiO_4)^{4-}$. Ikatan Si–O pada koordinasi tetrahedron memenuhi keduanya baik keterarahan dari ikatan kovalen maupun perbandingan dari radius atom relatif. Ada berbagai jenis struktur silikat karena berbagai cara kombinasi mungkin terjadi di antara tetrahedron SiO_4 atau antara tetrahedron SiO_2 dengan ion lain. Karena besarnya muatan ion Si^{4+} dan bilangan koordinasinya yang rendah, tetrahedron SiO_4 jarang dihubungkan dengan sudut bersamanya dan tak pernah dihubungkan dengan bidang bersamanya.

Suatu silikat di mana tiap tetrahedron tidak dihubungkan dengan yang lainnya dinamakan ortosilikat. Yang termasuk kelompok ini adalah olivin $(Mg, Fe^{II})_2(SiO_4)$ dan garnet $(Mg, Fe^{II}, Mn, Ca)_3(Cr, Al, Fe^{III})_2(SiO_4)_3$. Dalam olivin, ion oksigen membentuk struktur heksagonal susunan rapat yang terdistorsikan, sedangkan ion silikon menempati 1/8 tempat tetrahedral dalam heksagonal tersebut.

Kalau dua sudut dari setiap tetrahedron dipakai bersama dengan tetrahedron lainnya maka terbentuklah silikon rantai tunggal (inosilikat) atau silikat siklik (siklosilikat). Beril $(Be_3Al_2(SiO_3)_6)$ dan kordierit $(Mg, Fe)_2Al_3(Si_5AlO_{18})\cdot nH_2O$ adalah bahan galian khas berupa silikat siklik. Piroksen yang diwakili oleh enstatit $(MgSiO_3)$ dan wolastonit $(CaSiO_3)$ merupakan silikat rantai tunggal.

Kalau 2,5 sudut tetrahedron sebagai rata-rata, dipakai bersama dengan tetrahedron lainnya, maka akan terbentuk silikat rantai ganda (inosilikat). Amfibol yang diwakili oleh termolit $(Ca_2Mg_5Si_8O_{22}(OH)_2)$ dan ksonotlit $(Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2)$ merupakan bahan yang termasuk kelompok ini.

Kalau 3 dari 4 ion oksigen dalam setiap tetrahedron dipakai bersama, terjadi struktur berlapis yang terdiri dari $(Si_2O_5)^{2-}$. Dalam struktur lapisan silikat ini (filosilikat), ikatan antara lapisan berupa gaya van der Waals. Sebagai bahan khas yang berupa silikat berlapis adalah kaolinit $(Al_2Si_2O_5(OH)_4)$ dan talkum $(Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2)$. Kalau terjadi kekurangan ion positif karena substitusi isomorf ion di dalam lapisan silikat tersebut di atas, maka kation K, Na dan lainnya dapat masuk di antara lapisan tersebut, yang terikat dengan ikatan ion. Contoh bahan tersebut adalah mika, $KAl_2(Si_3Al)O_{10}(OH)_2$, $K(Mg, Fe^{II})_3(Si_3Al)\cdot O_{10}(OH)_2$ dst. Bahan ini merupakan bahan baku keramik yang penting.

Kalau keempat ion oksigen dalam satu tetrahedron dipakai bersama, terjadi jaringan tiga dimensi. Bahan ini dinamakan tektosilikat, ke dalam mana termasuk senyawa seperti anhidrida asam silikat (SiO_2), feldspar (MT_4O_8), dan seterusnya.

2 | SIFAT-SIFAT BAHAN KERAMIK

2.1 Sifat-sifat mekanik

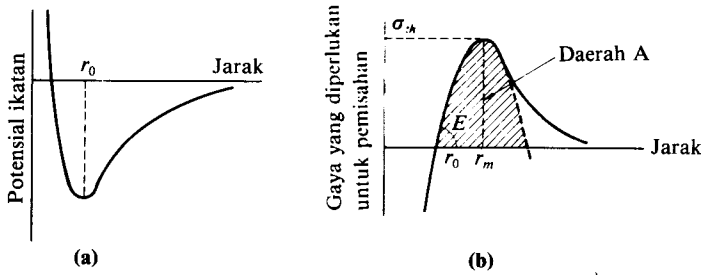
Berbagai jenis keramik termasuk semen, bata untuk bangunan, bata tahan api dan gelas telah dipergunakan sejak lama sebagai bahan konstruksi bangunan. Bidang penggunaan baru bagi keramik sebagai bahan konstruksi telah dikembangkan, sebagaimana telah terlihat dalam studi yang luas mengenai karbida silikon (SiC) dan nitrida silikon (Si_3N_4) sebagai bahan untuk turbin dan motor yang sangat efisien. Pada umumnya keramik memiliki sifat-sifat yang baik yaitu: keras, kuat dan stabil pada temperatur tinggi. Tetapi keramik bersifat getas dan mudah patah seperti halnya pada porselen, keramik cina ataupun gelas. Dalam bab ini dikemukakan penjelasan dasar yang diperlukan agar sifat-sifat mekanik dari keramik diketahui lebih baik. Hubungan tegangan-regangan dan konstanta elastis yang merupakan sifat khas dari bahan telah dikemukakan dalam bagian I.

2.1.1 Kekuatan dan patahan teoritis

Dalam tingkatan atom, patahan suatu zat padat merupakan pemisahan ikatan masing-masing dari atom dan ion untuk membentuk dua permukaan baru. Kekuatan teoritis dapat diperoleh sebagai berikut. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.15 (b), gaya yang diperlukan untuk memperbesar jarak antar atom adalah kecil di sekitar jarak keseimbangan antar atom (r_0) dalam keadaan biasa, tetapi meningkat sangat kalau jarak diperbesar dan mencapai harga maksimum σ_{th} pada jarak r_m. Kalau tegangan lebih besar dari σ_{th}, ikatan antar atom terputus sehingga terjadi patahan. Tegangan σ_{th} ini disebut kekuatan teoritis, yang dapat dihitung dengan mengasumsikan bahwa kurva yang ditunjukkan dalam Gb. 4.15(b) merupakan kurva sinus, dan energi luar yang diberikan (luas A) sama dengan jumlah energi permukaan (γ) dari permukaan yang baru terbentuk pada retakan.

$$\sigma_{th} = (\gamma E / r_0)^{1/2} \tag{4.1}$$

Persamaan ini disebut persamaan Orowan, menunjukkan bahwa kekuatan teoritis



Gb. 4.15 (a) Potensial ikatan antar atom dan (b) Gaya yang diperlukan untuk pemisahan.

Tabel 4.5 Kekuatan tarik teoritis dari bahan padat.

Bahan	Arah	E ($\times 10^{11}$ dyne/cm^2)	Energi permukaan (erg/cm^2)	σ_m ($\times 10^{11}$ dyne/cm^2)
Perak	⟨111⟩	12,1	1130	2,4
Emas	⟨111⟩	11,0	1350	2,7
Tembaga	⟨100⟩	6,7	1650	2,5
Tungsten	⟨100⟩	39,0	3000	8,6
Besi-α	⟨100⟩	13,2	2000	3,0
	⟨111⟩	26,0	2000	4,6
Seng	⟨0001⟩	3,5	100	0,38
Grafit	⟨0001⟩	1,0	70	0,14
Silikon	⟨111⟩	18,8	1200	3,2
Intan	⟨111⟩	121	5400	20,5
				11,1*
Gelas kuarsa		7,3	560	1,60
NaCl	⟨100⟩	4,4	115	0,43
				0,27*
MgO	⟨100⟩	24,5	1200	3,7
Al_2O_3	⟨0001⟩	46,0	1000	4,6

*Hasil perhitungan yang lebih teliti.

Tabel 4.6 Harga pendekatan kekuatan tarik dan modulus Young dari beberapa bahan keramik pada temperatur kamar.

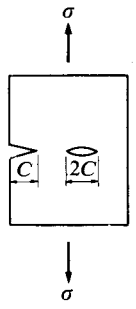
Bahan	Kekuatan tarik (MN/m^2)	Modulus Young (GN/m^2)
Alumina kristal tunggal	2000	460
Alumina disinter ($v_p \simeq 5\%$)	220–1070	380
Beryllia disinter ($v_p \simeq 5\%$)	140–280	320
B_4C dipres panas ($v_p \simeq 5\%$)	1070	300
Magnena disinter ($v_p \simeq 5\%$)	110	220
Spinel disinter ($v_p \simeq 5\%$)	90	250
Karbida silikon ($v_p \simeq 5\%$)	540	490
Gelas silika	110	75
Gelas Pyrex	70	72

v_p: void

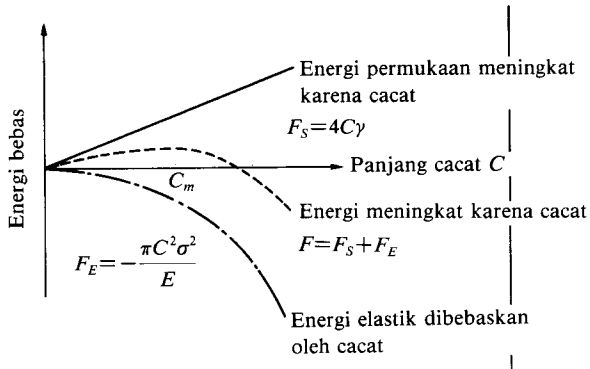
meningkat kalau jarak ikatan antar atom berkurang dan kalau energi permukaan serta modulus Youngnya meningkat. Lereng pada γ_0 dalam Gb. 4.15 (b) merupakan modulus Young yang memberikan hubungan antara tegangan dan regangan dari bahan. Tabel 4.5 menunjukkan kekuatan tarik teoritis bahan padat dihitung dengan mempergunakan persamaan (4.1).

Tabel 4.6 menunjukkan kekuatan tarik yang diukur dari beberapa bahan keramik. Jelas dari perbandingan dengan Tabel 4.5, bahwa kekuatan tarik hasil pengukuran umumnya mempunyai harga lebih kecil dari pada kekuatan teoritis. Tetapi pada wisker yang merupakan kristal hampir sempurna dan gelas kuarsa yang sempurna tak bercacat kekuatannya mendekati kekuatan tarik teoritis.

Griffith menjelaskan bahwa retakan pada permukaan atau bagian dalam dari benda padat memberikan perbedaan yang besar antara kekuatan terukur dan kekuatan teoritis. Kalau tegangan bekerja pada bahan, bahan menjalani deformasi elastik dan daya disimpan sebagai energi elastik. Kalau ada cacat di dalam bahan seperti ditunjukkan pada Gb. 4.16, pertumbuhan cacat membentuk permukaan baru dan sebagian energi elastik yang tersimpan dibebaskan (Gb. 417). Apakah retakan tumbuh atau



Gb. 4.16 **Retakan skematik di dalam dan di permukaan bahan.**



Gb. 4.17 **Perubahan energi bebas terhadap panjang retakan.**

tidak, ditentukan oleh hubungan antara jumlah energi yang dibebaskan (F_E) dan energi permukaan yang baru terbentuk (F_S), $F=F_E+F_S$, dan oleh panjang retakan (C). Pertumbuhan retakan akan terjadi pada syarat $\partial F/\partial C \leq 0$, dan

$$\frac{\partial F}{\partial C}=\frac{\partial(F_E+F_S)}{\partial C}=-\frac{2\pi C\sigma^2}{E}+4\gamma \leq 0 \tag{4.2}$$

Kalau terjadi ketidaksamaan dalam persamaan (4.2) maka retakan akan timbul menuju terjadinya patah. Kalau C pada $\partial F/\partial C=0$ adalah C_m dan panjang retakan mula adalah C_0, maka retakan tidak tumbuh apabila $C_0<C_m$, dan keadaan kritis terjadi pada $C_0=C_m$.

Tegangan patah minimum (σ_f) yang diperlukan, pada $\partial F/\partial C=0$, didapat dari persamaan (4.2):

$$\sigma_f=(2\gamma E\ \pi C)^{1/2} \tag{4.3}$$

Kalau r_0 dalam persamaan (4.1) adalah 2 Å dan $C=1\ \mu$m, maka σ_f/σ_{th} kira-kira 1/100, jadi jelas bahwa kekuatan bahan sangat berkurang disebabkan adanya retakan. Dalam uraian di atas, tegangan diumpamakan merata di setiap bagian bahan. Tetapi sebenarnya terjadi pemusatan tegangan pada ujung retakan yang besarnya ditentukan oleh panjang retakan dan bentuk lengkungn ujung retakan. Pemusatan tegangan ini menurunkan perbandingan σ_f σ_{th} lebih jauh lagi.

Dari alasan di atas, kekuatan patah bahan yang mempunyai retakan lebih kecil dari pada kekuatan idealnya. Kalau suatu retak berada dalam bahan, tegangan dapat dinyatakan dengan mengubah persamaan (4.3) sebagai berikut:*

$$\sigma=K_I/\sqrt{\pi C} \tag{4.4}$$

Konstanta K_I disebut faktor intensitas tegangan dan pada $\sigma=\sigma_f$ *disebut faktor intensitas tegangan kritis,* K_{IC}. Harga $K_{IC}(=(2\gamma E)^{1/2})$ menunjukkan bahwa retakan akan tumbuh menuju patah kalau $\sigma(\pi C)^{1/2}$ mencapai harga tersebut, harga itu disebut keuletan patah.

K_{IC} diperoleh dengan mengukur panjang retak tiruan yang dibuat dan tegangan

*Dari persamaan (4.4) $K_I=\sigma\sqrt{\pi C}$. Hubungan ini berlaku kalau cacat kecil berada di tengah pelat besar. Untuk hal yang lebih umum dipakai persamaan $K_I=n\sigma\sqrt{\pi C}$ di mana n berubah tergantung pada posisi dan ukuran cacat

patahnya. Biasa harga ini berbeda dengan harga teoritis. Untuk keperluan perencanaan sangat penting mengetahui harga K_{IC} dari suatu bahan. Harga K_{IC} dari keramik yang getas adalah kecil, untuk gelas lebih kecil dari 1, untuk alumina 5, dan untuk zirkonia yang sebagian distabilkan kira-kira 7–10 yang merupakan salah satu harga terbesar dari keramik, satuannya adalah $MN_m^{-3/2}$. Harga K_{IC} untuk baja kira-kira 70 $MN_m^{-3/2}$ yang jauh lebih besar dari pada harga untuk keramik. Sebab dari perbedaan ini ialah bahwa di dalam logam, sebagian dari energi yang diberikan dipakai untuk deformasi plastis yaitu untuk menggerakkan atom-atom yang membebaskan pemusatan tegangan.

2.1.2 Kekuatan dan struktur

Dari uraian di atas telah jelas mengapa kekuatan keramik sensitif terhadap struktur. Faktor utama yang mempengaruhi struktur keramik dan juga kekuatannya ialah kehalusan permukaan, volum dan bentuk dari pori, ukuran dan bentuk butir, jenis dan bentuk fasa batas butir dan cacat yang disebabkan oleh tegangan dalam seperti halnya tegangan termal.

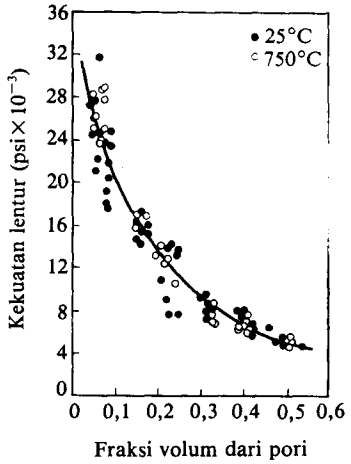
Gb. 4.18 adalah satu contoh yang menunjukkan hubungan antara keporusan dan kekuatan bahan yang disinter. Pada umumnya kalau kekuatan pada keporusan nol adalah σ_0, kekuatan pada keporusan V_p dapat dinyatakan,

$$\sigma = \sigma_0 \exp(-bV_p) \tag{4.5}$$

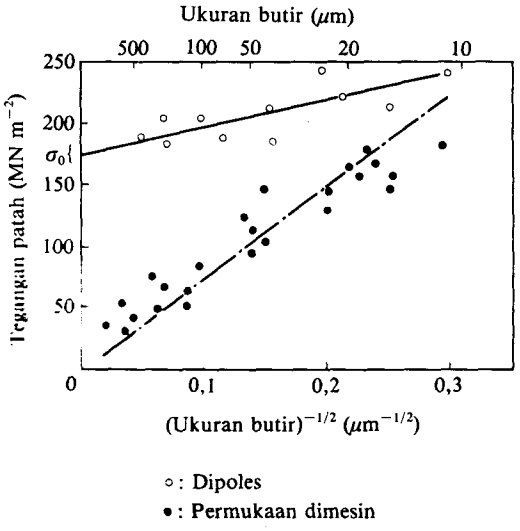
di mana σ_0 adalah kekuatan pada keporusan nol dan b adalah konstanta. Harga b berkisar antara 3 dan 11, umumnya kira-kira 5.

Gb. 4.19 menunjukkan hubungan antara diameter butir rata-rata dan kekuatan lentur. Hubungan yang paling sering digunakan antara diameter butir (d) dan kekuatan (σ) adalah:

$$\sigma = \sigma_\infty + kd^{-1/2} \tag{4.6}$$



Gb. 4.18 Keporusan dan kekuatan lentur alumina.



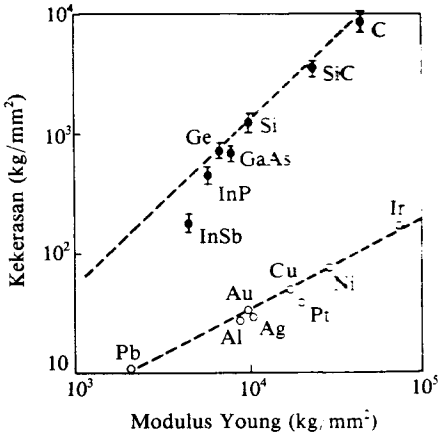
Gb. 4.19 Pengaruh ukuran butir terhadap kekuatan MgO pada 20°C.

di mana σ_∞ dan k adalah konstanta. Gambar menunjukkan kesesuaian dengan persamaan tersebut, bahwa dengan mengecilnya ukuran butir kekuatan meningkat. Akibat ini menunjukkan bahwa kalau butir pembentuk keramik mempunyai diameter kecil, maka ukuran retakan yang terdapat di dalamnya juga kecil. Kalau retak terjadi pada butir tertentu, ia akan berhenti pada batas butir dan tegangan disebarkan melalui batas butir tersebut. Dari penjelasan tersebut maka batas butir keramik memberikan pengaruh yang serius terhadap kekuatannya. Sebagai contoh, kalau fasa yang bersifat seperti gelas terbentuk pada batas butir maka pada umumnya kekuatan keramik menurun. Retakan mudah bergerak melalui gelas, dan penghambat perambatan retakan oleh batas butir tidak dapat diharapkan.

2.1.3 Kekerasan

Kekerasan yang dimiliki intan (kekerasan Mohs 10) dan korundum (kekerasan Mohs 9), adalah salah satu ciri khas bahan keramik dengan kekerasannya yang tinggi. Kekerasan adalah ukuran tahanan bahan terhadap deformasi plastis pada permukaan bahan. Beberapa cara pengukuran kekerasan telah ditetapkan dengan cara deformasi yang berbeda. Salah satu cara ialah kekerasan Mohs, sedangkan cara pengukuran kekerasan Vickers, Brinell dan Knoop dipakai dalam industri telah dijelaskan dalam Bagian I.

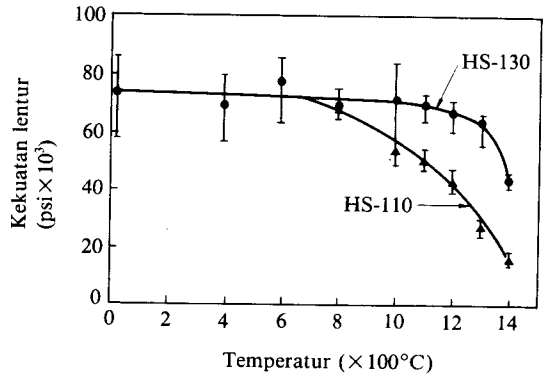
Penekanan pada bahan getas seperti keramik dalam banyak hal mengakibatkan retakan lokal mengikuti deformasi elastik. Sukar sekali menghubungkan secara teoritis antara kekerasan yang memiliki proses rumit tersebut dengan sifat-sifat fisiknya. Tetapi secara empiris diketahui bahwa ada hubungan antara tegangan patah dengan kekerasan Vickers (H), $\sigma_f = H/n$, di mana n berkisar sekitar 3 untuk logam dan 30–50 untuk keramik. Selanjutnya seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.20 terdapat hubungan tertentu antara kekerasan dan modulus Young yang secara eksperimen diketahui dipengaruhi oleh jenis dan ikatan kristal.



Gb. 4.20 Hubungan antara kekerasan dan modulus Young bagi logam *fcc* dan kristal kovalen (struktur intan).

2.1.4 Kekuatan pada temperatur tinggi

Walaupun beberapa permasalahan dalam pembuatan dan kegetasan masih belum dapat dipecahkan, keramik memiliki ketahanan termal dan kestabilan kimia, dan mempunyai kemungkinan penggunaan pada temperatur tinggi sebagai bahan teknik yang baru, yang tidak dapat dilaksanakan oleh bahan logam. Penurunan yang cepat



(Ketakmurnian pada HS-110) ≈ (ketakmurnian pada HS-130) × 10

Gb. 4.21 Kurva kekuatan (σ_f)-Temperatur (T) bagi Si_3N_4-MgO yang dipadatkan dan disinter (1 psi = 0,07 kg/cm²).

dari kekuatan dan deformasi plastis sering juga ditemukan dalam bahan keramik pada temperatur melebihi 1000°C. Gejala deformasi plastis yang meningkat menurut waktu pada tegangan tetap pada temperatur tinggi, disebut melar (*creep*). Melar adalah suatu gejala yang rumit yang melibatkan pergeseran pada batas butir, dislokasi dalam kristal, difusi dari pori dan lainnya, yang secara terperinci telah dijelaskan dalam Bagian I.

Gb. 4.21 menunjukkan kekuatan pada temperatur tinggi dari spesimen Si_3N_4 yang dipres panas, yang sekarang menarik perhatian khusus sebagai bahan tahan temperatur tinggi. Dalam HS-130, MgO ditambahkan sebagai bahan pensinter untuk Si_3N_4. Fasa gelas terbentuk dalam jumlah sedikit mengingat pertikel Si_3N_4 yang tak dapat disinter. HS-110 adalah spesimen yang mempunyai komposisi sama seperti di atas, tetapi mengandung CaO sebagai ketakmurnian pada MgO. Dari gambar jelas terlihat bahwa kekuatan temperatur tinggi ditentukan oleh fasa terlemah dan yang paling mungkin berdeformasi di antara fasa lainnya dan bukan ditentukan oleh fasa utama yang merupakan bagian terbesar dari bahan.

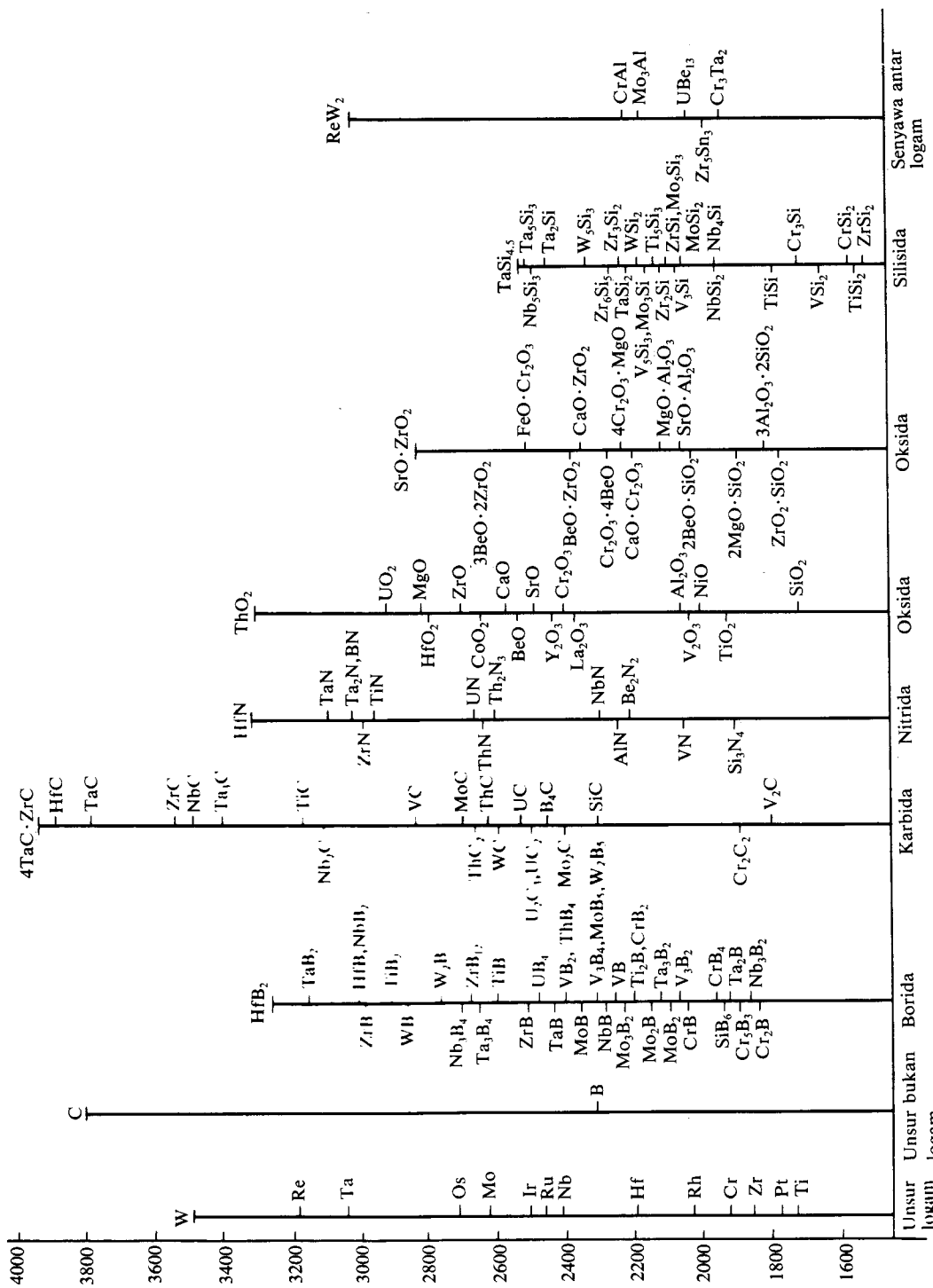
2.2 Sifat termal

Semua keramik boleh dikatakan dibuat dengan melalui pemanasan pada temperatur tinggi dan sejumlah keramik dimanfaatkan karena sifat termalnya yang unggul, seperti sifat tahan panas, hantaran panas, ketahanan terhadap kejutan termal, dsb, Jadi, pemahaman secara mendasar mengenai sifat-sifat termal dari keramik ini penting.

Di bawah ini dijelaskan sifat dasar termasuk titik cair, kapasitas kalor, pemuaian termal, hantaran termal, tegangan termal dan tekanan kejutan termal.

2.2.1 Titik cair

Titik cair dari kristal adalah temperatur di mana energi bebas Gibbs dari fasa padat dan fasa cair ($G = H - TS$) adalah sama. Sejalan dengan itu titik cair tidak dapat ditentukan dari analisa sederhana pada fasa padat saja. Tetapi pendekatan berikut ini yang menjelaskan mengenai titik cair secara intuisi dan mudah dimengerti hampir mendekati kebenaran.



Gb. 4.22 Perbandingan titik cair senyawa.

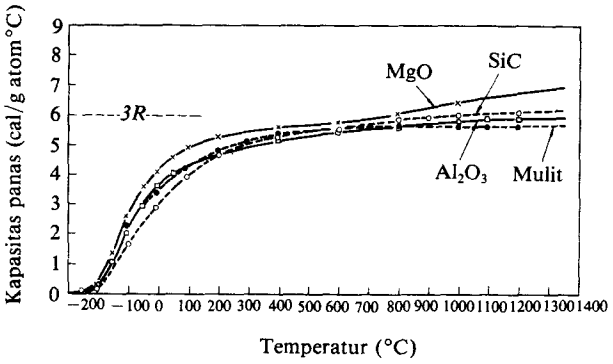
Menurut Gb. 4.2 yang menunjukkan energi potensial antar atom, jarak antar atom pada temperatur 0°K adalah d_0. Dengan meningkatnya temperatur, amplitudo getaran termal meningkat pula dan titik pusat nyata dari getaran termal bergerak menuju d yang lebih besar, akibat kurva potensial yang asimetri. Ini berarti, jika jarak antar-atom bertambah, akan menyebabkan pemuaian termal. Selanjutnya, temperatur yang getaran termalnya menjadi terlalu bagi suatu atom untuk tetap tinggal di tempatnya dalam kristal, dinamakan titik cair. Sejalan dengan itu ada hubungan erat antara kekuatan atau gaya ikatan antar-atom titik cair kristal. Sebagai contoh kristal oksida yang memiliki kation valensi tinggi seperti ThO_2 dan HfO_2 mempunyai tarik-menarik Coulomb yang kuat antara ion negatif dan ion positif, dan titik cairnya tinggi (Gb. 4.22). Selanjutnya, kristal kovalen dari karbida, nitrida dan unsur tunggal memiliki ikatan antar atom yang kuat dan titik cair tinggi.

2.2.2 Kapasitas panas

Energi yang diperlukan untuk menaikkan temperatur 1°K dari bahan disebut kapasitas panas. Harga tersebut pada tekanan tetap disebut kapasitas panas tekanan tetap (C_p) dan pada kondisi volume tetap disebut kapasitas panas volum tetap (C_v). Satuan C_p dan C_v kal·mol^{-1}·der^{-1}. Kapasitas panas per gram (c_p, c_v) disebut panas jenis. Biasanya C_p dapat diukur sedangkan C_v dipergunakan dalam studi teoritis. Dalam kristal ada hubungan, $C_p - C_v = \beta^2 KVT$, di mana β adalah koefisien pemuaian volum, K adalah modulus elastik volum dan V volum molar. Perbedaan panas jenis itu kecil biasanya dapat diabaikan, tetapi pada temperatur tinggi perbedaan tersebut dapat berarti.

Seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.23 untuk beberapa bahan keramik, kapasitas kristal pada 0°K adalah nol, kemudian meningkat menurut temperatur dan menjadi hampir konstan pada temperatur tinggi. Harga tersebut kira-kira 6 kal·der^{-1} per gram atom dan tidak tergantung pada jenis kristal.

Ada dua mekanisma dari penyerapan panas oleh krisal, yang pertama adalah oleh getaran atom yang kedua oleh pergerakan elektron. Umumnya yang pertama relatif sangat besar. Dengan mengumpamakan semua atom dalam kristal bergetar secara harmonis pada frekuensi tunggal yang sama, secara teoritis Einstein menurunkan harga C_v sama dengan nol pada temperatur nol derajat Kelvin dan mendekati harga 3 R (5,96 kal·mol^{-1}·der^{-1}) pada temperatur tinggi. Debye mengumpamakan bahwa ada distribusi tertentu pada frekuensi getaran atom dan menurunkan persamaan yang menjelaskan kapasitas panas terukur lebih baik dari rumus Einstein.



Gb. 4.23 Kapasitas panas beberapa bahan keramik pada temperatur yang berbeda.

Seperti telah dikemukakan di atas, kapasitas panas pada temperatur tinggi dapat diperkirakan untuk hampir semua bahan. Perubahan kapasitas panas oleh transformasi polimorf adalah tajam dan terlihat dalam transisi α-β dari kuarsa, tetapi perubahan dalam harga mutlak secara keseluruhan adalah kecil. Tetapi. perubahan besar dari kapasitas panas dijumpai dalam hal transformasi teratur-tak teratur dari Fe^{2+} dan Fe^{3+} dalam megnetit (Fe_3O_4) pada 118 K, karena disertai oleh perubahan keadaan elektron dalam kristal.

Atom dalam gelas tidak tersusun secara teratur seperti halnya dalam kristal. Oleh karena itu, aturan sederhana bagi kristal tidak dipergunakan dalam hal kapasitas panas. Tetapi, kapasitas panas pada temperatur sedikit di bawah temperatur transisi gelas adalah 0,7–0,95 kali dari harga 3 R bagi banyak jenis gelas oksida.

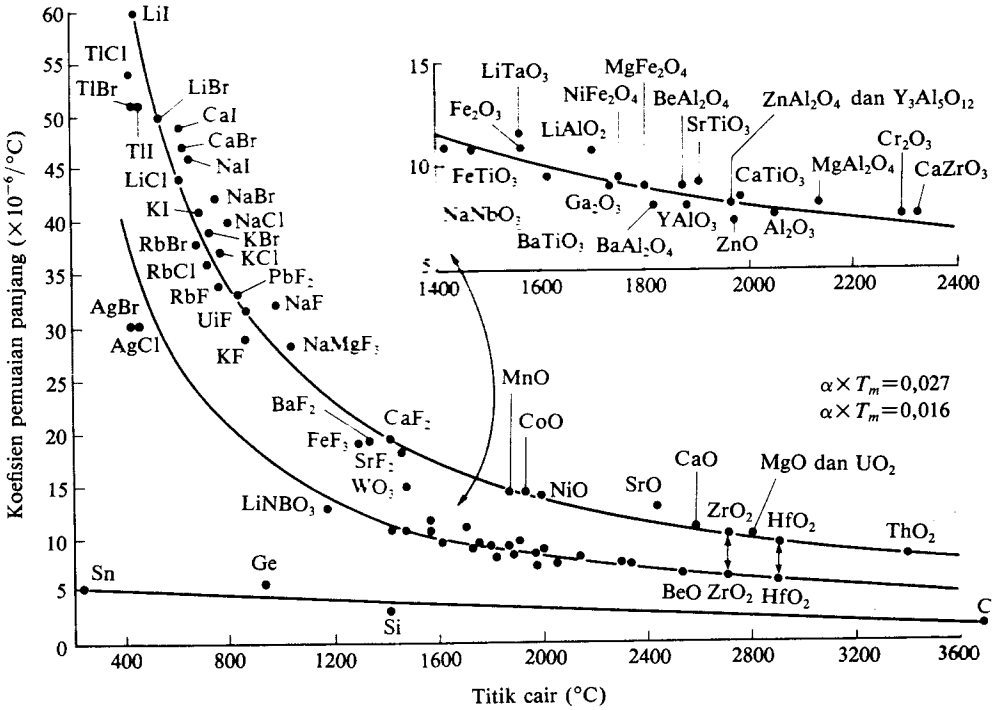
2.2.3 Pemuaian termal

Gejala pertambahan volume bahan mengikuti peningkatan temperatur disebut pemuaian termal. Koefisien pemuaian volum (β) dan koefisien pemuaian panjang (α) didefinisikan dalam persamaam berikut dengan satuan der^{-1}

$$\beta = \frac{1}{V}\left(\frac{dV}{dT}\right)_P \tag{4.7}$$

$$\alpha = \frac{1}{l}\left(\frac{dl}{dT}\right)_P \tag{4.8}$$

Seperti telah dikemukakan sebelumnya pada penjelasan mengenai titik cair, pemuaian termal disebabkan oleh bertambah-besarnya jarak antar atom karena getaran termal



Gb. 4.24 Hubungan antara koefisien pemuaian panjang (α) dengan titik cair (T_m).

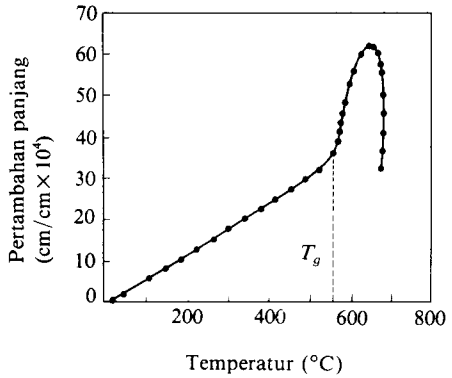
dari atom dalam medan potensial asimetri. Pemuaian termal struktur sederhana sangat tergantung pada kekuatan ikatan antar atom, karena perubahan dalam jarak ikatan antar atom berhubungan langsung dengan pemuaian termal kisi kristal. Demikian juga hal itu sudah tentu berhubungan dengan sifat-sifat kristal lainnya. Gb. 4.24 menunjukkan suatu contoh. Hubungan itu di mana hasil kali koefisien pemuaiaan panjang dengan titik cair adalah tetap, dapat diterapkan untuk banyak kristal. Tetapi bagi beberapa kristal yang memiliki struktur rumit seperti silikat, pemuaian termal atau penyusutan termal disebabkan oleh sudut ikatan antar atom (contoh, sudut Si–O–Si) kadang-kadang jauh lebih besar dari pada yang disebabkan oleh getaran termal. Terhadap kristal semacam itu, hubungan sederhana di atas dapat dipergunakan.

Kristal yang bukan sistim kubus memiliki susunan atom berbeda menurut arah, oleh karena itu memiliki pula anisotropi dalam pemuaian termal dan juga dalam sifat lainnya. Kebanyakan keramik mempunyai isotropi dalam pemuaian termal walaupu terdiri dari kristal anisotropi, karena sifat-sifat adalah sebagai rata-rata dari keseluruhan bahan polikristal. Dalam hal ini koefisien pemuaian panjang dari bahan polikristal kira-kira 1/3 dari koefisien pemuaian volum dari kristal pembentuk.

Transisi fasa kristal sering disertai oleh perubahan volum yang besar. Pemuaian yang abnormal diikuti oleh transisi α–β dari kuarsa dan kristabolit dan penyusutan besar disertai oleh transformasi monoklin ke tetragonal pada sistim zirkonia umpamanya. Table 4.7 menunjukkan koefisien pemuaian panjang dari keramik. Gb. 4.25 menunjukkan contoh khas dari kurva pemuaian termal dari gelas. Pada temperatur lebih tinggi dari temperatur transisi gelas (T_g), koefisien pemuaian meningkat sangat dan di atas temperatur pelunakan gelas mudah sekali berubah bentuk.

Tabel 4.7 Koefisien pemuaian termal rata-rata untuk beberapa bahan.

Bahan	Koefisien pemuaian panjang, 0–1000°C ($°C^{-1} \times 10^6$)	Bahan	Koefisien pemuaian panjang, 0–1000°C ($°C^{-1} \times 10^6$)
Al_2O_3	8,8	ZrO_2 (distabilkan)	10,0
BeO	9,0	Gelas silika difusikan	0,5
MgO	13,5	Gelas silika kapur-soda	9,0
Mulit	5,3	TiC	7,4
Spinel	7,6	Porselen	6,0
ThO_2	9,2	Refraktori lempung api	5,5
UO_2	10,0	Y_2O_3	9,3
Zirkon	4,2	TiC Cermet TiC	9,0
SiC	4,7	B_4C	4,5



Gb. 4.25 Pemuaian termal pada gelas.

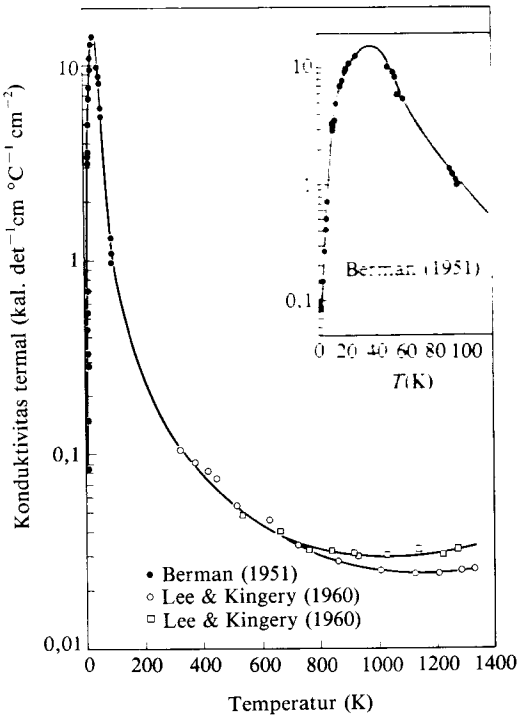
2.2.4 Konduksi termal

Panas dipindahkan dengan tiga macam mekanisma, yaitu konduksi, konveksi, dan radiasi. Ketiga mekanisma tersebut secara umum terlibat dalam proses perpindahan panas secara umum. Perpindahan panas dalam keramik hanya mencakup konduksi dan radiasi saja.

Fluks energi panas q melalui luas penampang A pada arah x dinyatakan oleh persamaan (4.9), di mana dT/dx menunjukkan gradien temperatur, k adalah koefisien konduksi termal dengan satuan $cal \cdot cm^{-1} \cdot det^{-1} der^{-1}$.

$$q = \frac{dQ}{dt} = -kA\frac{dT}{dx} \tag{4.9}$$

Dalam zat padat ada tiga pembawa energi bagi konduksi termal, yaitu elektron, getaran kisi dan foton. Gelombang elastik meneruskan panas karena perbedaan dalam getaran termal dari atom pada daerah temperatur tinggi dan daerah temperatur rendah. Ini adalah konduksi termal karena vibrasi kisi. Dengan menganggap gelombang elastik ini sebagai partikel yang bergerak pada kecepatan tinggi, partikel terkuantisasi, dan disebut fonon. Pada temperatur tinggi perpindahan panas dengan radiasi dari golombang elektromagnetik menjadi sangat berarti. Gelombang elektromagnetik yang dikuantumkan disebut foton. Pada umumnya hantaran termal dari logam adalah besar, karena panas dipindahkan oleh elektron yang bergerak bebas dalam kristal. Keramik adalah isolator yang hantaran termalnya karena elektron dapat diabaikan. Fonon menpunyai peranan bagi hantaran termal dalam keramik. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.26 hantaran termal alumina sangat kecil pada temperatur sangat rendah, dan cenderung meningkat sangat cepat menurut temperatur, menurun kembali pada atau di atas 40°K, dan meningkat lagi pada atau di atas 1000°K. Perubahan ini dapat



Gb. 4.26 Konduktivitas termal kristal tunggal oksida aluminium.

Tabel 4.8 Konduktivitas termal beberapa bahan karamik.

Bahan	Konduktivitas termal (kal/det/cm²/°C/cm) pada	
	100°C	1000°C
Al_2O_3	0,072	0,015
BeO	,525	,049
MgO	,090	,017
$MgAl_2O_4$	,036	,014
ThO_2	,025	,007
Mulit	,014	,009
$UO_{2,00}$	,024	,008
Grafit	,43	,15
ZrO_2 (distabilkan)	,0047	,0055
Gelas silika difusikan	,0048	,006
Gelas silika-kapur-soda	,004	-
TiC	,060	,014
Porselen	,004	,0045
Refraktasi lempung-api	,0027	,0037
TiC Cermet	,08	,02

dihubungkan dengan perubahan panas jenis dan menurunnya lintasan bebas rata-rata oleh antaraksi fonon dengan fonon. Meningkatnya hantaran panas pada temperatur tinggi disebabkan oleh foton yang terutama penting bagi bahan tembus cahaya.

Tabel 4.8 menunjukkan konduktivitas termal dari beberapa bahan keramik. Konduktivitas termal yang tinggi ditemukan pada kristal yang terdiri dari unsur yang berat atomnya hampir sama dan mempunyai struktur kristal dengan gaya ikatan antar atom yang kuat. Pemindahan fonon sangat mudah terjadi. contohnya pada BeO dan intan. Dalam gelas yang berstruktur sebarang, pemindahan fonon sukar terjadi dan konduktivitas termalnya kecil. Hantaran termal dalam porselen adalah kecil karena fonon disebarkan oleh batas butir dan oleh pori.

2.2.5 Tegangan termal dan tahanan kejut termal

Kalau satu benda padat ditahan bagian luarnya dan temperaturnya dinaikkan dengan ΔT, maka terjadi tegangan tekan (σ) dalam benda padat itu karena penahanan pemuaian termal.

$$\sigma = -E \cdot \alpha \Delta T \tag{4.10}$$

E adalah modulus Young benda padat, dan α koefisien pemuaian panjang. Dalam hal pendinginan, tegangan termal σ ini berupa tegangan tarik. Pada umumnya tegangan termal timbul kalau setiap bagian benda padat ditahan dan tidak dapat bergerak bebas. Sebagai tambahan terhadap perbedaan temperatur, tegangan termal dipengaruhi oleh laju perubahan temperatur, oleh hantaran termal dari benda padat dan oleh bentuknya. Sebagai contoh, temperatur di bagian tengah dan di permukaan pelat akan berbeda. Kalau temperatur permukaan adalah T_S dan temperatur di bagian yang tidak menerima tegangan termal adalah T_a, maka tegangan di permukaan (tegangan tekan kalau $T_a < T_s$) dinyatakan oleh persamaan (4.11).

$$\sigma = \frac{E\alpha}{1-\mu}(T_a - T_s) \tag{4.11}$$

dengan μ sebagai perbandingan Poisson.

Kalau tegangan termal melampuai kekuatan patah (S) dari bahan, maka akan ter-

jadi retakan yang menyebabkan patah. Pada umumnya kekuatan tekan keramik adalah tinggi sedangkan kekuatan tariknya rendah. Karena itu keramik mudah pecah selama pendinginan, karena tergangan tarik terjadi pada permukaan. Perbedaan temperatur maksimum yang dapat diterima tanpa retak (ΔT_{maks}) didapat dari persamaan (4.11), sebagai berikut:

$$R=\Delta T_{maks}=\frac{S(1-\mu)}{E\alpha} \tag{4.12}$$

ΔT_{maks} ini merupakan harga khas dari bahan, dan yang disebut koefisien tahanan retak kejut termal, umumnya dinyatakan dengan R. Persamaan pengevaluasi R berubah menurut kondisi dan metoda penggunaan kejutan termal, tetapi bahan harus memenuhi kriteria berikut agar R besar.

1) Kekuatan patah tinggi dan hantaran termal tinggi, dan
2) Koefisien pemuaian panjang kecil, modulus Young rendah dan perbandingan Poissonnya kecil.

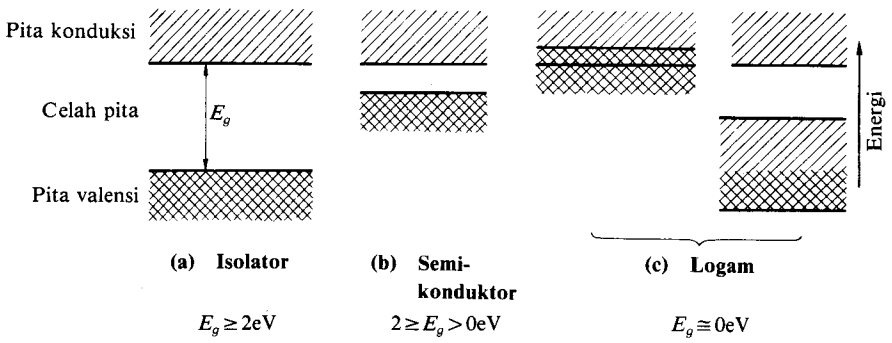
Bahan yang mengandung pori memiliki tahanan kejut termal lebih tinggi dari pada bahan yang pejal, karena tegangan direlaksasikan oleh pori.

2.3 Sifat listrik dan magnet

Seperti terlihat pada alumina, mika dan gelas kuarsa, kebanyakan keramik tidak menghantar listrik secara praktis. Jadi keramik dipakai sebagai bahan isolosi sejak waktu yang lama. Tetapi sejumlah senyawa termasuk oksida dan sulfida sekarang ditemukan mempunyai sifat yang menarik, yaitu bersifat: konduktor listrik tinggi, semikonduktor, dielektrik, magnet atau konduktor ion, dst. Kebanyakan sifat dari bahan yang disebut keramik elektronik itu ditentukan oleh kelakuan elektron yang dimiliki atom atau ion yang membentuk bahan. Untuk lebih mengerti mengenai hal ini konsep dasarnya dijelaskan di bawah ini.

2.3.1 Pita energi dan hantaran listrik

Untuk mengerti mengenai hantaran listrik oleh elektron, perhatikan keadaan elektron dalam kristal. Elektron pada atom yang terpisah ditempatkan pada orbital tertentu sekeliling inti, yaitu arbital *s*, *p*, *d*, *f*, dst. Tetapi kalau atom didekatkan satu sama lain, terjadilah antaraksi. Tingkat energi elektron dalam kristal, di mana atom berada dalam susunan berkala, menjadi suatu pengulangan dari tingkat yang hampir terdistribusikan secara kontinu (pita) dan daerah tanpa tingkat energi yang diizinkan (pita terlarang). Gb. 4.27 menunjukkan struktur pita dari isolator, semikonduktor dan logam, yang dilukiskan secara skematik. Semua tingkat dalam pita valensi dari isolator dan semikonduktor diisi, dan gerakan bebas dari elektron dihalangi. Karena itu, hal tersebut tidak memberikan sumbangan kepada hantaran listrik. Pada temperatur nol mutlak tidak terdapat elektron dalam pita energi di atas pita valensi. Tetapi pada temperatur tinggi, elektron yang memasukinya karena eksitasi termal, bebas bergerak dan menghasilkan listrik. Maka pita energi disebut pita konduksi. Dalam logam pita valensi dan pita konduksi sebagian tumpang tindih dan karenanya mempunyai konduktivitas listrik yang tinggi. Pada isolator ada celah energi yang besar (E_g) antara pita valensi dan pita konduksi. Eksitasi agar elektron masuk ke pita konduksi sangat sukar sehingga konduktivitas listriknya rendah. Dalam bahan yang memiliki E_g kecil elektron lebih mudah dieksitasi secara termal. Bahan tersebut



Gb. 4.27 Penyajian skematik dari pita energi dalam.

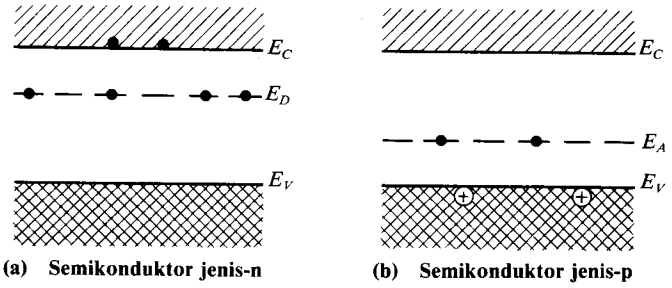
Tabel 4.9 Tahan listrik beberapa bahan pada temperatur kamar.

Bahan	Tahanan (ohm-cm)
Logam:	$1{,}7\times10^{-6}$
Tembaga	10×10^{-6}
Molibden	$5{,}2\times10^{-6}$
Tungsten	$5{,}5\times10^{-6}$
ReO_3	2×10^{-6}
CrO_2	3×10^{-5}
Semikonduktor:	
Karbida silikon rapat	10
Karbida boron	0,5
Bermanium (murni)	40
Fe_3O_4	10^{-2}
Isolator:	
Gelas SiO_2	$>10^{14}$
Porselen steatit	$>10^{14}$
Bata lempung api	10^{8}
Porselen voltase rendah	10^{12}–10^{14}

dinamakan semikonduktor yang mempunyai hantaran listrik di antara logam dan isolator. Jumlah elektron yang tereksitasi bertambah menurut temperatur, dan hantaran listrik semikonduktor dan isolator meningkat pada temperatur tinggi, sedangkan dalam logam bersifat khas menurun pada temperatur tinggi. Tabel 4.9 menunjukkan contoh tahanan listrik dari tiga jenis bahan.

Si (E_g=1,17 eV) dan Ge (E_g=0,66 eV) dari kelompok IV khas merupakan semikonduktor, sedangkan InP (E_g=1,3 eV) dan Ga As (E_g=1,4 eV), yang juga merupakan senyawa kovalen yang kuat antara kelompok III dan IV adalah semikonduktor yang berguna. Sebagai tambahan terhadap bahan tersebut di atas, ZnO, SnO_2, Cu_2O, V_2O_5, ZnS, SnS, ZnSe, $ZnFe_2O_4$, Fe_3O_4 dst. menunjukkan sifat semikonduktor.

Sedikit ketakmurnian dan cacat yang terdapat pada semikonduktor memberikan pengaruh yang drastis terhadap konduktivitas. Ketakmurnian menghasilkan tingkat energi baru dalam pita terlarang dari semikonduktor dan merubah konsentrasi pembawa. Sebagai contoh kalau P yang memiliki satu elektron valensi lebih daripada Si, ditambahkan pada Si, tingkat kelebihan elektron menjadi tepat di bawah pita konduksi (Gb. 4.28(a)). Elektron dalam tingkat ketidakmurnian ini (tingkat donor) mudah dieksitasi ke dalam pita konduksi. Semikonduktor di mana elektron (pembawa negatif) memberikan sumbangan terhadap konduksi listrik, disebut semikonduktor



Gb. 4.28 Penyajian skematik dari pita energi.

jenis-n. Di lain fihak, tingkat penerima ialah yang menerima elektron meninggalkan lubang positif dalam pita valensi. Semikonduktor jenis-p ialah yang muatan listriknya dibawa oleh perpindahan lubang positif yang terbentuk dalam pita valensi (Gb. 4.28(b)). ZnO, SnO, TiO_2, dan V_2O_5 adalah semikonduktor jenis-n, sedangkan Cu_2O, SnO, NiO_2 dst adalah semikonduktor jenis-p. Ada beberapa unsur yang dapat berupa jenis-p dan jenis-n yaitu Si dan Ge.

2.3.2 Konduktor ion

Bahan yang menghantarkan listrik karena pergerakan ion melalui bentuk padat disebut konduktor ion. Bahan yang memiliki konduktitivas ion pada temperatur cukup rendah disebut elektrolit zat padat dan dipergunakan untuk sensor potensial kimia (untuk mendeteksi tekanan parsial dari gas dan konsentrasi bahan), batere, pompa kimia dan penggunaan lainnya beberapa di antaranya telah ada dalam perdagangan.

Sifat khas struktur kristal dengan konduktivitas listrik ion yang tinggi secara kasar dapat dibagi menjadi tiga kelompok. Yang pertama adalah struktur yang mempunyai banyak cacat kisi. Zirkonia adalah sebagai satu contoh. Struktur temperatur tinggi distabilkan sampai temperatur kamar dengan menambahkan sedikit kation aliovalen seperti CaO atau Y_2O_3. Kristal ini mempunyai banyak cacat oksigen dan menunjukkan konduktivitas ion oksigen yang tinggi seperti dijelaskan dalam Tabel 4.10. Yang kedua adalah yang dinamakan struktur rata-rata, yang tempatnya diisi oleh ion dalam struktur kristal yang jumlahnya berlebihan lebih banyak dari ion yang sebenarnya ada. Contoh khas jenis ini adalah $RbAg_4I_5$, di mana struktur temperatur tinggi dari AgI distabilkan (Tabel 4.10). Yang ketiga adalah struktur yang mempunyai lintasan konduksi dari jaringan yang saling berhubungan atau struktur berlapis

Tabel 4.10 Elektrolit padat dan ion difusinya.

Bahan	Ion difusi	Konstanta dielektrik ($ohm^{-1} \cdot cm^{-1}$)
KH_2PO_4	H^+	-10^{-6} (200°C)
$Li_{2-x}O_{1-x}F_x$ ($x<0{,}18$)	Li^+	10^{-5}-10^{-3} (300°C)
$Na_2O \cdot 11Al_2O_3$	Na^+	-10^{-1} (200°C)
AgBr	Ag^+	-10^{-2} (300°C)
$RbAg_4I_5$	Ag^+	0,27 (24°C)
Cu_2HgI_4	Cu^+	-19^{-5} (70°C)
$Ca_xZr_{1-x}O_{2-x}$ ($0{,}1<x<0{,}2$)	O^{2-}	-10^{-3} (700°C)
$Y_xZr_{1-x}O_{2-x/2}$ ($x \approx 0{,}06$, 0,08)	O^{2-}	-10^{-2} (700°C)

meluas dalam dua dimensi, melalui mana ion dapat bergerak dengan mudah. Sebagai salah satu contoh adalah β-alumina ($Na_2O \cdot 11Al_2O_3$), yang mempunyai lapisan konduksi di mana ion Na^+ dapat dengan mudah menembusnya.

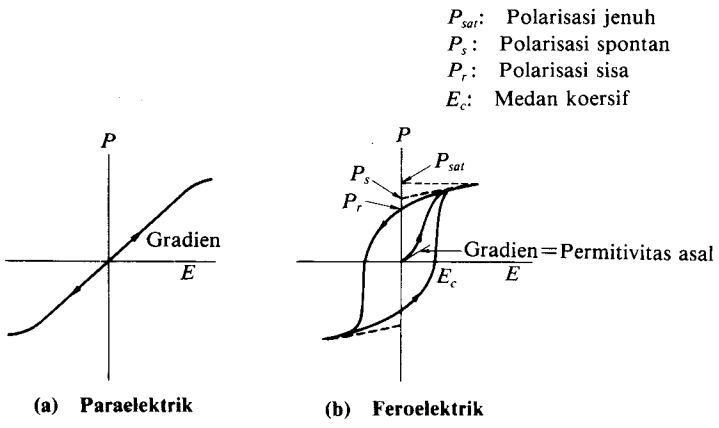
2.3.3 Polarisasi dan dielektrisitas

Kalau medan listrik bekerja di luar suatu isolator, terjadi perpindahan dan deformasi dalam distribusi elektron dalam ion, dan posisi tempat ion dapat berubah sedikit bagi beberapa jenis bahan. Kalau momem dipol terbentuk dan meningkat menurut medan listrik, gejala ini disebut polarisasi. Dalam kristal yang tidak mempunyai titik pusat simetri, tempat kation dikelilingi oleh anion yang pada umumnya bergeser dari titik pusatnya dan kristal ada dalam keadaan terpolarisasikan tanpa adanya medan listrik luar. Gejala ini disebut polarisasi spontan. Isolator yang dipolarisasikan oleh medan listrik luar disebut dielektrik.

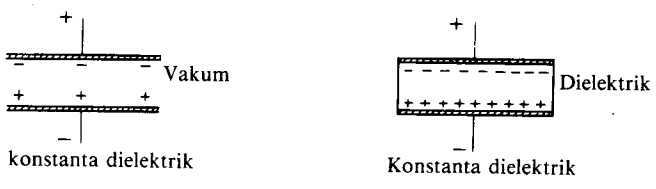
Kurva khas antara medan listrik-polarisasi ditunjukkan dalam Gb. 4.29. Dalam bahan paraelektrik, polarisasi berbanding lurus dengan medan listrik dalam suatu daerah tertentu. Dalam bahan paraelektrik, ada daerah (domain) polarisasi spontan yang dapat dibalik. Arahnya dapat diarahkan sejajar medan listrik di atas medan *coercive* (pengkutuban). Dengan pengkutuban ini polarisasi remanen atau polarisasi sisa (P_r) tertinggal apabila medan listrik dihilangkan, dan kurva menunjukkan lup histeresis yang jelas.

Dalam kapasistor yang terdiri dari elektroda paralel (Gb. 4.30), kapasitas statik (C) ditentukan sebagai berikut:

$$C = \varepsilon S/d$$



Gb. 4.29 Kurva medan listrik-polarisasi dari dielektrik.



Gb. 4.30 Konstanta dielektrik.

di mana $S(m^2)$luas pelat, $D(m)$=jarak antara pelat, dan ε adalah dielektrik dari isolator.

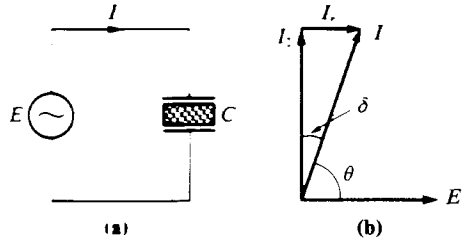
Kalau isolator antara pelat kapasitor disingkirkan, kapasitas statik (C_0) diukur dalam vakum. C_0 lebih kecil dari C dan perbandingan ε_S:

$$\varepsilon_S = C/C_0 = \varepsilon/\varepsilon_0$$

ε_0 adalah konstanta dielektrik dalam vakum, yaitu $8{,}854\times10^{-12}$ $(F\cdot m^{-1})$ dan sama dengan satu dalam satuan elektrostatik cgs. ε_S disebut permitivitas relatif dari bahan dielektrik, tetapi sering hanya disebut konstanta dielektrik. Tabel 4.11 menunjukkan konstanta dielektrik beberapa keramik. Kalau voltase arus bolak balik bekerja pada bahan dielektrik, diperlukan energi listrik. Ini disebut kerugian dielektrik. Dalam isolator ideal, perbedaan fasa antara medan listrik dan arus listrik adalah 90°. Tetapi dalam dielektrik yang sesungguhnya mengalir arus listrik dengan fasa yang sama dengan fasa medan listrik, menyebabkan fasa antara medan listrik dan arus listrik berbeda lebih kecil dari 90° sebesar δ (Gb. 4.31). Kerugian dielektrik sebanding lurus dengan tan δ, yang makin kecil makin baik. Tetapi ada kecenderungan bahwa konstanta dielektrik yang tinggi sering disertai oleh besarnya tan δ.

Tabel 4.11 Konstanta dielektrik, kekuatan isolasi dan kerugian dielektrik (tan δ) dari keramik.

Bahan	Konstanta dielektrik	Kekuatan isolator	tan δ
Gelas kuarsa	3,8	6000 kV/cm	0,0001
Kaca jendela	6,9	2500	0,01
MgO polikristal	9,3	100	0,0003
Al_2O_3 "	9,5	100–300	0,001
TiO_2 "	96	20–120	0,0003
$BaTiO_3$ "	1200–1500	120	0,01



Gb. 4.31 Mekanisma kerugian dielektrik.

$BaTiO_3$ dengan struktur perovskit adalah khas bahan feroelektrik. Dalam kristal ini Ti^{4+} dikelilingi oleh enam O^{2-}, tetapi bergeser dari titik berat ke enam O^{2-} karena radius ionnya kecil, dan terjadi polarisasi spontan. Transformasi dari tetragonal ke kubus terjadi pada $BaTiO_3$ pada atau di atas 120°C dan polarisasi spontan hilang.

Kalau medan listrik bekerja pada bahan feroelektrik yang dikutubkan, ion dipindahkan lebih lanjut dan menjadi serupa dengan keadaan seperti yang didistorsikan oleh tegangan luar. Sebaliknya, kalau gaya luar bekerja, diperoleh listrik yang berhubungan dengan perubahan polarisasi. Ini dinamakan pizoelektrik. Dari gejala ini dapat diperoleh saling transformasi atara gaya dan listrik, yang dipergunakan secara luas untuk penggetar piezoelektrik, penyalaan pizoelektrik, transformer pizoelektrik, kartrij audio, dan lain sebagainya. Elemen pizoelektrik terkenal dengan

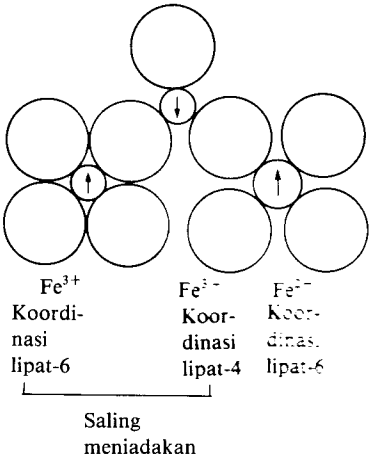
sebutan PTZ, yaitu suatu larutan padat dari senyawa perovskit yang diwakili oleh Pb (Zr, Ti)O_3. Substitusi ion untuk membentuk larutan padat sangat mungkin dalam struktur perovskit, dan dimanfaatkan untuk memperbaiki berbagai sifat khasnya.

2.3.4 Kemagnetan

Mekanisma terjadinya momem magnet, peramagnet, feromagnet dan sebagainya dalam bahan, telah dikemukakan pada Bagian II. Kebanyakan bahan keramik yang tidak mengandung logam transisi ataupun elektron asimetri seperti MgO, Al_2O_3 dan SiO_2, adalah diamagnetik, di mana hanya terjadi pemagnetan yang lemah karena adanya medan magnet luar. Akan tetapi ada sekelompok oksida yang disebut ferit, yang merupakan bahan ferimagnetik dan dipakai secara luas untuk inti magnet listrik, magnet permanen, tip perekam magnetik, bahan memori, bahan magnetostriksi, bahan gelembung magnetik dan lain sebagainya. Ferit memiliki struktur magnetoplumbit (yaitu $BaO \cdot 6Fe_2O_3$), struktur garnet (yaitu $3Y_2O_3 \cdot 5Fe_2O_3$), struktur spinel, yang paling umum dinyatakan oleh $RO \cdot Fe_2O_3$, di mana R adalah ion divalen seperti Fe^{2+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Co^{2+}, Ni^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}, Cd^{2+}, dan seterusnya.

Kebanyakan dari ferit spinel mempunyai struktur mendekati spinel terbalik (lihat 1.2 Bagian IV). Dalam struktur spinel terbalik ini, setengah dari Fe^{3+} menempati tempat tetrahedral dan setengahnya lagi dari Fe^{3+} dan R^{2+} menempati tempat oktahedral. Arah spin dipengaruhi oleh lingkungan dan mungkin berbeda walaupun untuk jenis atom yang sama. Sebagai contoh, arah spin untuk Fe^{3+} pada koordinasi lipat 4 dan lipat 6 adalah berlawanan, lihat Gb. 4.32. Satu sama lain saling meniadakan karena jumlah Fe^{3+} dalam kedua koordinasi ini adalah sama. Momentum spin dalam ferit dengan struktur spinel terbalik sudah pasti ditentukan oleh R^{2+} yang mengisi tempat dari koordinasi lipat 6. Sebagai contoh, jumlah bilangan kuantum (S) dari momentum sudut spin untuk $Mn \cdot Fe_2O_3$ adalah 5* (harga yang didapat adalah 5,0) karena lima elektron asimetri dalam Mn^{2+}, dan untuk $FeO \cdot Fe_2O_3$ adalah 4** (harga yang didapat adalah 4,2), dan untuk $CoO \cdot Fe_2O_3$ adalah 3** (harga yang didapat adalah 3,3).

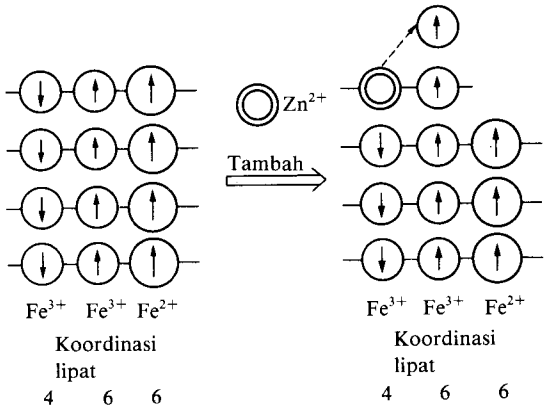
Ferit tersebut membentuk larutan padat sempurna, dan sifat-sifatnya dapat diper-



Gb. 4.32 Arah spin dalam $FeO \cdot Fe_2O_3$ dan antar aksinya.

*Harga yang sama didapat kalau diasumsikan struktur spinel normal, karena kedua Mn^{2+} dan Fe^{3+} mempunyai lina elektron asimetri.

**Ketidak-cocokan antara harga perhitungan dan harga yang didapat memberikan pemikiran bahwa keadaan itu tidak dalam struktur spinel terbalik yang sempurna.



Gb. 4.33 Perubahan momen magnetik oleh penambahan Zn^{2+}.

baiki dengan pemanfaatan larutan padat. Harga *S* dapat diperbaiki oleh pembentukan larutan padat antara ferit yang mempunyai struktur spinel terbalik dan $ZnO \cdot Fe_2O_3$ yang mempunyai struktur spinel normal dan tidak mempunyai pemagnetan spontan, dan menjadi lebih besar dari setiap komponen tunggalnya (Gb. 4.33). Gejala ini merupakan sifat yang manarik dari bahan ferimagnetik dan dipergunakan luas dalam praktek.

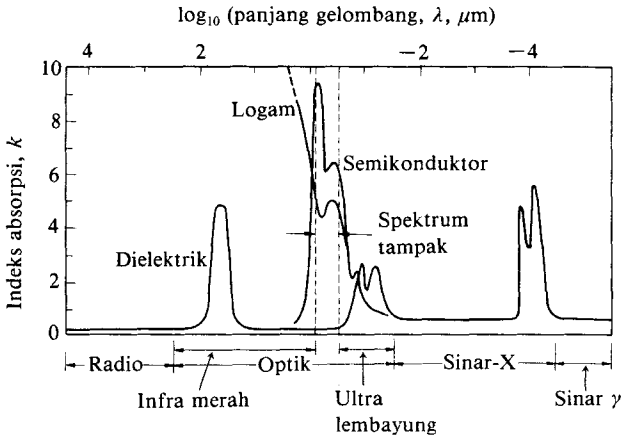
2.4 Sifat-sifat lainnya

2.4.1 Sifat optik

Hubungan antara keramik dan cahaya adalah sangat erat dan telah lama dipakai pada kaca jendela, peralatan gelas, gelas optik, pigmen, zat fluoresensi dan seterusnya. Pengembangan yang baru mencakup serat optik untuk sistem komunikasi dan informasi dan bahan optik baru yang indeks bias dan transmisi cahayanya berubah dengan medan listrik dan medan magnetik yang diterapkan.

(1) Antaraksi cahaya dan bahan, dan pewarnaan

Cahaya adalah gelombang elektromagnetik, yang mempunyai panjang gelombang lebih pendek dari gelombang radio, tetapi lebih panjang dari sinar-X dan sinar-γ. Pada umumnya, gelombang yang panjangnya dari 1 nm sampai 1 mm disebut cahaya. Cahaya tampak mempunyai panjang gelombang dari 400 sampai 800 nm dan mempunyai energi dari 3 sampai 1,5 eV. Pada waktu menembus bahan cahaya dengan panjang gelombang tertentu diabsorpsi. Gb. 4.34 menunjukkan secara skematik pengaruh panjang gelombang terhadap indeks absorpsi cahaya dalam logam, semikonduktor dan dielektrik (isolator). Dua mekanisma utama dari cahaya dalam bahan (Gb. 4.34) adalah: Pertama, absorpsi oleh resonansi yang terjadi pada frekuensi cahaya yang kira-kira sama dengan sifat khas getaran atom dalam zat padat. Absorpsi cahaya ini terjadi pada panjang gelombang yang panjang dan yang terpendek adalah 4 μm dalam SiO_2, 6,2 μm dalam TiO_2 dan 25 μm dalam NaCl (Gb. 4.35). Panjang gelombang ini ditentukan oleh kekuatan ikatan antar-atom dan berat atom. Dalam kristal yang terdiri dari atom yang ringan dan mempunyai gaya ikatan kuat, panjang gelombang resonansi berada di dalam daerah tengah inframerah, sedangkan yang terdiri atom

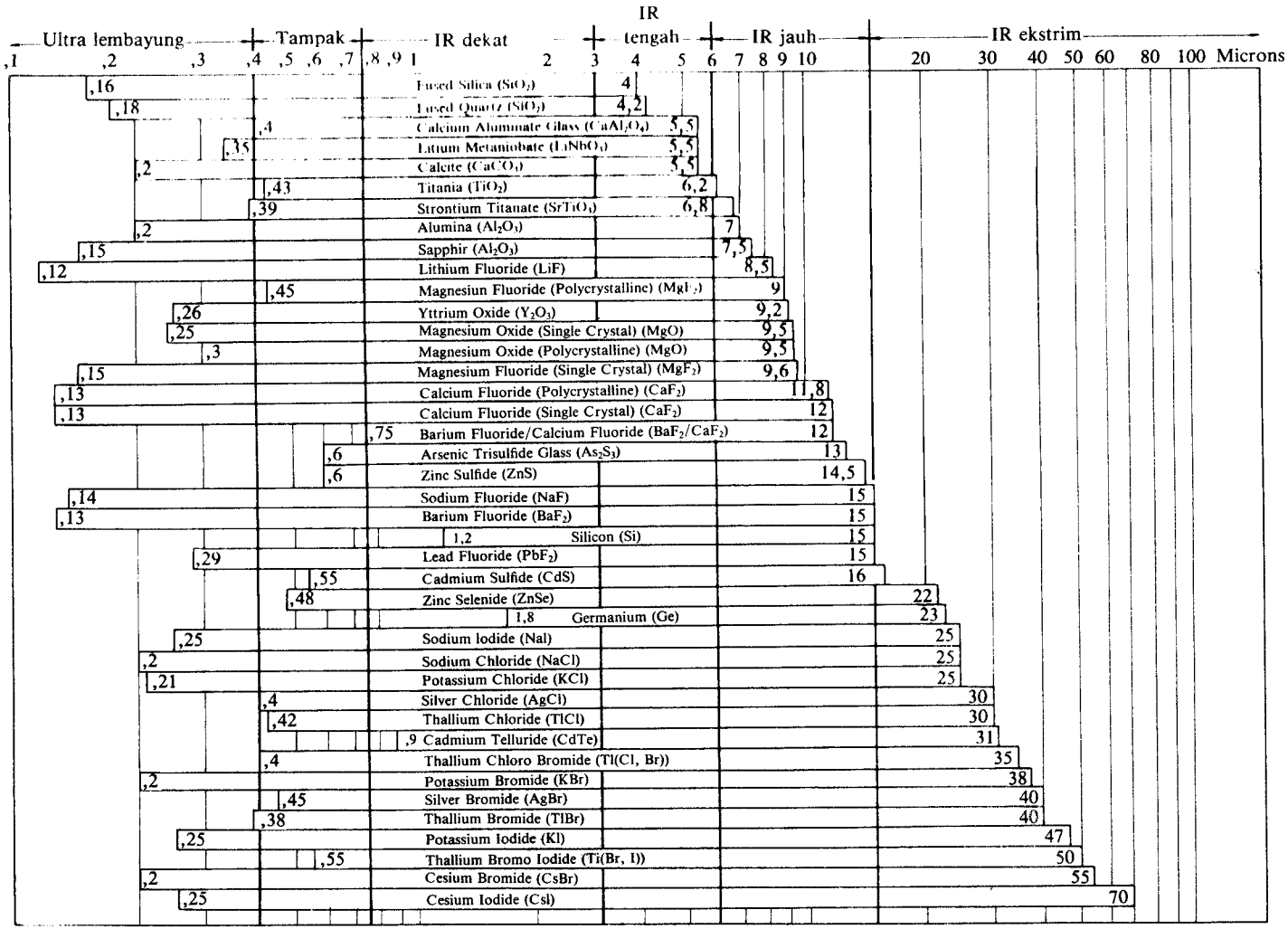


Gb. 4.34 Variasi frekuensi dari indeks absorpsi untuk logam, semikonduktor dan dielektrik.

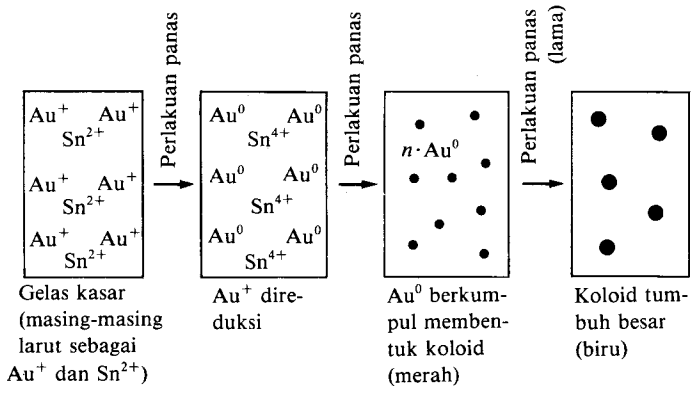
yang berat dengan gaya ikatan lemah, menunjukkan absorpsi resonansi pada panjang gelomgang yang lebih panjang. Kedua, absorpsi lain terjadi kalau elektron dari atom dan ion dieksitasi oleh cahaya yang diabsorpsi. Dalam bahan yang memiliki elektron bebas, absorpsi demikian terjadi dalam daerah cahaya tampak, dan logam tentu tidak tembus cahaya. Celah energi antara pita konduksi dan pita valensi dalam keramik dielektrik (lihat Gb. 4.27), pada umumnya 5 eV atau lebih. Jadi bahan dielektrik ini tembus cahaya bagi daerah cahaya tampak seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.34, tetapi mengabsorpsi cahaya ultraviolet yang mempunyai energi melebihi E_g. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.28, suatu tingkat energi baru terbentuk oleh ketakmurnian antara pita konduksi dan pita valensi dan mengabsorpsi cahaya tampak. Kalau ketakmurnian ini merupakan unsur transisi, atau unsur tanah jarang, transisi elektron antara orbital elektron diperbolehkan karena orbital *d* atau *f* yang belum penuh. Gelombang tertentu yang mempunyai energi yang berhubungan dengan transisi tersebut, diserap, dan bahan menjadi berwarna. Tabel 4.12 menunjukkan hubungan antara ion logam transisi dalam gelas dan warnanya. Orbital 3*d* dalam ion logam transisi adalah orbital terluar dan mudah dipengaruhi oleh kondisi dari koordinasi sekeliling. Maka warna dapat berubah menurut koordinasi. Di lain fihak pewarnaan dengan bahan tanah jarang tidak banyak dipengaruhi oleh lingkungan, karena orbital transisi 4*f* dihalangi oleh orbital 5*s* dan 5*p*. Sedangkan tingkat ketakmurnian yang terbentuk oleh cacat oksigen memiliki distribusi energi yang lebar seperti terlihat pada TiO_2, dst. cahaya

Tabel 4.12 Pengaruh valensi dan bilangan koordinasi pada pewarnaan logam transisi.

Ion	Pengaruh valensi	Pengaruh bilangan koordinasi
Ti	Ti^{4+} (tak berwarna), Ti^{3+} (biru-jingga)	
V	V^{3+} (hijau), V^{5+} (kuning-merah-coklat)	
Cr	Cr^{3+} (hijau), Cr^{6+} (kuning)	
Mn	Mn^{2+} (tak berwarna), Mn^{3+} (merah-jingga)	
Fe	Fe^{2+} (biru-biru-hijau)	
	Fe^{3+} (kuning-hijau)	
Co		$Co^{2+}O_6$, merah, $Co^{2+}O_4$ (biru)
Ni		$Ni^{2+}O_6$ (kuning), $Ni^{2+}O_4$ (jingga)
Cu	Cu^{+} (tak berwarna), Cu^{2+} (biru)	



Gb. 4.35 Daerah penembusan yang berguna (melebihi 10%) dari bahan setebal 2 mm.



Gb. 4.36 Pertumbuhan koloid dalam gelas ruby emas.

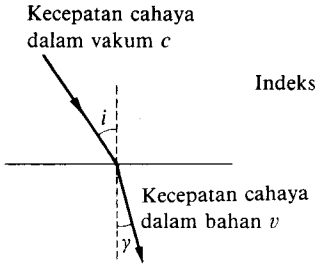
dengan panjang gelombang lebih lebar diserap, dan menjadi kelihatan gelap.

Sebagai tambahan kepada pewarnaan oleh absorpsi elektron yang dijelaskan di atas, ada juga pewarnaan oleh logam koloid dan senyawa. Gelas dapat diwarnai menjadi merah oleh koloid oleh koloid emas dan koloid tembaga, dengan koloid perak menjadi kuning (lihat Gb. 4.36). Pada penyinaran yang diberi koloid AgCl terdisperti, perak mengendap dan gelas menjadi lebih hitam. Kalau penyinaran dihentikan, perak menjadi AgCl lagi dan gelas menjadi tembus cahaya lagi. Gejala ini dipakai dalam gelas fotosensitif.

(2) Pembiasan dan dispersi

Cahaya, gelombang elektromagnetik yang melalui bahan dielektrik memindahkan kabut elektron sekeliling inti atom. Maka terjadi polarisasi dan sebagai akibatnya kecepatan cahaya menjadi lebih kecil daripada dalam vakum. Perubahan kecepatan cahaya merubah arah cahaya, indeks bias dapat diperoleh dengan mengukur kecepatan cahaya (Gb. 4.37). Indeks bias suatu bahan meningkat menurut meningkatnya jumlah dipol pada volume tetap, yaitu bertambah besarnya massa jenis. Selanjutnya bahan yang memiliki kemampuan polarisasi yang besar, yaitu bahan yang mengandung nomor atom yang besar dan ion valensi yang kecil, memiliki indeks bias yang besar. Tabel 4.13 menunjukkan indeks bias berbagai keramik.

Polarisasi berubah menurut frekuensi cahaya, dan indeks bias juga berubah menurut frekuensi dan panjang gelombang. Ini dinamakan dispersi, dan derajatnya ditentukan oleh bilangan Abbe (ν)*. Dispersi menyebabkan gejala bahwa titik fokus



Indeks bias $n=\frac{c}{v}=\frac{\sin i}{\sin \gamma}$

Gb. 4.37 Pembiasan cahaya dan indeks bias.

*$\nu=(\eta_D-1)/(\eta_F-\nu_C)$ dimana η_D, η_F dan η_C masing-masing adalah indeks bias pada panjang gelombang dari garis D Natrium (589,3 mμ), garis F hidrogen (486,1 mμ) dan garis C hidrogen (656,3 mμ). Variasi indeks bias dengan panjang gelombang menurun kalau ν meningkat.

suatu lensa berubah menurut panjang gelomng cahaya, yaitu aberasi kromatik. Umumnya bahan yang memiliki indeks bias tinggi mempunyai dispersi tinggi pula.

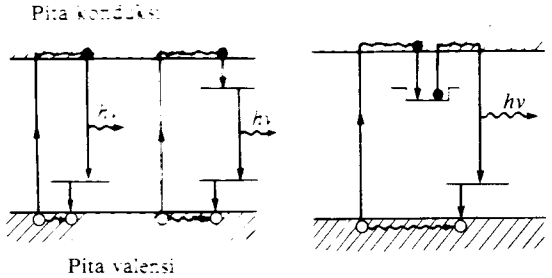
Dalam kristal, pelurusan atom berubah menurut arah. Jadi juga indeks bias berubah menurut arah sumbu kristal dan getaran gelombang cahaya (pembiasan ganda). Sifat-sifat optik seperti indeks bias kristal, derajat pembiasan ganda dst, adalah sifat khas setiap kristal, dan dapat dipakai untuk mengenal jenis kristal. Gelas pada umumnya mempunyai sifat isotropi, tetapi bahan itu menunjukkan pembiasan berganda di bawah tegangan. Tegangan dalam gelas dapat diukur dengan mempergunakan gejala ini.

(3) Fluoresensi dan laser

Kalau elektron dalam bahan dieksitasi oleh golombang elektromagnetik berupa cahaya dan sinar-X, jaras elektron dan reaksi kimia, bahan akan mengeluarkan cahaya pada pengembalian ke tingkat dasar seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.38. Gejala ini disebut luminisensi. Kalau cahaya keluar segera setelah eksitasi, disebut fluoresensi. Dalam fosforesensi, tingkat terperangkap dari elektron muncul seperti ditunjukkan dalam gambar, dan emisi berakhir dalam waktu yang lama. Pembahasan mengenai apakah elektron tereksitasi memancarkan cahaya atau tidak oleh sendirinya, memerlukan teori kuantum yang tidak dikemukakan di sini.

ZnS [Ag, Cu, Au, Cl], Y_2O_2S [Eu], $Ca_{10}(PO_4)_6$ (F, $Cl)_2$ [Sb, Mn], adalah bahan khas fluoresen, dan banyak dipakai dalam TV berwarna dan lampu fluoresen. Tanda kurung [ ] menunjukkan bahwa unsur tersebut merupakan aktivator, di mana warna dan luminisensi diatur.

Luminesensi oleh fluoresensi adalah tidak teratur dalam waktu dan fasa cahaya berbeda. Dalam laser, fasa dibuat sama oleh amplifikasi terinduksi. Pada laser ruby, energi diberikan dari luar dengan lampu sorot, dst dan cahaya yang keluar dipantulkan oleh kaca untuk membuat lebih banyak elektron dari Cr^{3+} pada tingkat antara daripada ditingkat dasar (suatu keadaan pada temperatur negatif). Cahaya yang kuat dengan fasa yang sama keluar kalau elektron pada tingkat antara dipindahkan ke tingkat dasar. Inilah cahaya laser.



Gb. 4.38 Eksitasi elektron dan emisi dari (a) fluoresen dan (b) fosforesen oleh transisi dari tingkat tereksitasi ke tingkat dasar.

2.4.2 Sifat kimia

Salah satu sifat khas dari keramik adalah kestabilan kimia. Tetapi, slag dan gelas berfusi pada temperatur tinggi merusak bata tahan api. Selanjutnya umur bahan dibatasi oleh berbagai reaksi kimia seperti elusi gelas dalam alkali, korosi refraktori oleh alkali dan gas halogen, korosi beton oleh air laut dst. Di lain fihak, sifat kimia

dari permukaan keramik dapat dimanfaatkan secara positif. Karbon aktif, silika gel, zeolit, dsb, mempunyai luas permukaan besar dan dipakai sebagai bahan pengabsorb. Kalau oksida logam dipanaskan pada kira-kira 500°C, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.14, permukaannya menjadi bersifat asam atau bersifat basa. Alumina γ, zeolit, lempung asam atau S_2O_2–TiO_2 demikian juga berbagai oksida biner dipakai sebagai katalis, yang memanfaatkan aksi katalitik dari titik bersifat asam dan basa pada permukaan.

Tabel 4.13 Indeks bias beberapa gelas dan kristal.

Bahan	Indeks bias rata-rata	Birefringence
Komposisi gelas		
Bentuk ortoklas ($KALSi_3O_8$)	1,51	
Bentuk albit ($NaALSi_3O_8$)	1,49	
Bentuk neflin sienit	1,50	
Gelas silika, SiO_2	1,458	
Gelas Vycor (96% SiO_2)	1,458	
Gelas soda-kapur-silika	1,51–1,52	
Gelas borosilikat (Pyrex)	1,47	
Gelas optik flint rapat	1,6–1,7	
Gelas trisulfida arsen As_2S_3	2,66	
Kristal:		
Klorida silikon, $SiCl_4$	1,412	
Fluorida litium, LiF	1,392	
Fluorida natrium, NaF	1,326	
Fluorida kalsium, CaF_2	1,434	
Korundum, Al_2O_3	1,76	0,008
Periklas, MgO	1,74	
Kuarsa, SiO_2	1,55	0,009
Spinel, $MgAl_2O_4$	1,72	
Zirkon, $ZiSiO_4$	1,95	0,055
Ortoklas, $KAlSi_3O_8$	1,525	0,007
Albit, $NaAlSi_3O_8$	1,529	0,008
Anortit, $CaAl_2Si_2O_8$	1,585	0,008
Silimanit, $Al_2O_3 \cdot SiO_2$	1,65	0,021
Mulit, $3Al_2O_3 \cdot SiO_2$	1,64	0,010
Rutil, TiO_2	2,71	0,287
Karbida silikon, SiC	2,68	0,043
Litarge, PbO	2,61	
Galena, Pbs	3,912	
Kalsit, $CaCO_3$	1,65	0,17
Silikon, Si	3,49	
Telurida kadmium, CdTe	2,74	
Sulfida kadmium, CdS	2,50	
Strontium titanat, $SrTiO_3$	2,49	
Litium niobat, $LiNbO_3$	2,31	
Oksida yitrium, Y_2O_3	1,92	
Selenida seng, ZnSe	2,62	
Barium titanat, $BaTiO_3$	2,40	

3 | KERAMIK PUTIH

3.1 Pendahuluan (Klasifikasi)

Keramik putih yang ditinjau di sini adalah keramik yang terdiri dari tiga komponen utama yaitu lempung-felspar-flint, namun demikian selalu ada suatu ketaktentuan dalam definisinya. Keramik tanah berkapur dengan kadar kapur atau dolomit yang tinggi dihasilkan secara luas di Eropa khususnya. Peralatan porselen mencakup berbagai jenis peralatan makan, peralatan dapur untuk memasak dan pengawetan, alat-alat untuk kelayakan hidup seperti mangkuk permen, pipa dan asbak, dekorasi seperti jambangan bunga, hiasan dari sesuatu yang baru, alat-alat saniter seperti bak cuci atau jambangan tempat buang air. tegel luar dan dalam rumah, isolasi, pipa dari bahan tanah, gigi porselen, porselin kimia dan sebagainya. Jadi, keramik putih digunakan dalam banyak segi. Ini mudah dimengerti mengingat bahwa produksinya adalah yang tertua dalam peradaban manusia bersama-sama dengan pertanian.

Keramik putih dapat digolongkan ke dalam keramik tanah, keramik batu dan porselen oleh keadaan pembakarannya. Benda bakar yang putih, tak bersifat seperti kaca dan strukturnya rapat, mempunyai daya serap air 3% atau lebih, disebut keramik tanah. Keramik batu adalah benda bakar yang rapat, tak mempunyai kepermeabelan terhadap gas atau cairan tanpa glasur, dan tak tembus cahaya. Porselen juga rapat dan kedap udara seperti keramik batu, dan jernih karena adanya fasa gelas dalam jumlah yang banyak. Untuk campuran yang sama, porselen mempunyai temperatur pembakaran tertinggi. Namun demikian, temperatur vitrifikasi (temperatur menjadi gelas). di mana benda berubah menjadi porselen, berubah secara nyata karena jenis bahan mentahnya dan perbandingan pencampurannya. Dari abad ke 17–18 orang Eropah sudah mulai terpesona oleh porselen dari Negeri Timur lebih dari pada terhadap emas. Barang-barang tersebut dibuat dari batu pot berkualitas tinggi yang divitrifikasikan pada temperatur yang agak rendah.

Tabel 4.14 Keasaman dan kebasaan oksida.

	Oksida tunggal	Oksida biner
Asam padat	ZnO, Al_2O_3, TiO_2 CeO_2, As_2O_3, V_2O_5 SiO_2, Cr_2O_3, MoO_3	SiO_2–Al_2O_3, B_2O_3, Al_2O_3 Cr_2O_3–Al_2O_3, MoO_3–Al_2O_3 ZrO_2–SiO_2, Ga_2O_3–SiO_2 BeO–SiO_2, MgO–SiO_2 CaO–SiO_2, SrO–SiO_2 Y_2O_3–SiO_2, La_2O_3–SiO_2 SnO–SiO_2, PbO–SiO_2 $MoO_3 \cdot Fe_2(MoO_4)_3$ MgO–B_2O_3, TiO_2–ZnO
Basa padat	BeO, MgO, CaO SrO, BaO, SiO_2 Al_2O_3, ZnO	SiO_2–Al_2O_3, SiO_2–MgO SiO_2–CaO, SiO_2–SrO SiO_2–BaO

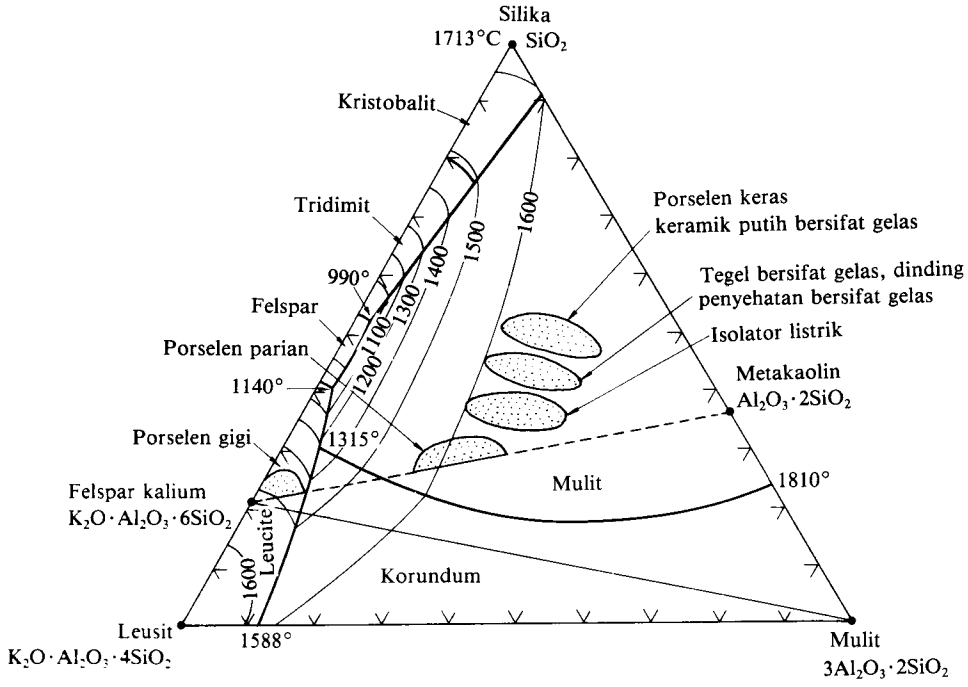
Tabel 4.15 Penggolongan piring makan (A. S).

Nama	Tempat asal	Penyera-pan air (%)	Tahanan impak	Baur cahaya	Komposisi standar bahan utama (%)				
					Kaolin	Lempung	Kuarsa	Felspar	Lainnya
Majolica	Hampir di semua tempat	>15	Sangat rendah	Tidak	–	–	–	–	Lempung tak murni pembakaran rendah, komposisi tak menentu
Alat tanah halus	Inggris Eropa	10–15	Rendah	Tidak	31	20	20	4	
Keramik cina semi vitrious	A.S	4–10	Medium-tinggi	Sedikit-tidak	29	25	25	21	Pirofilit 15 Talk 10
Porselen semi vitrious	A.S	0,3–4	Tinggi	Sedikit	32	20	36	12	
Karamik cina hotel Amerika	A.S	<0,3	Sangat tinggi	Medium-banyak	28	15	39	15	Dolomit 3
Keramik cina rumah Amerika	A.S	<0,1	Sangat tinggi	Banyak	32	9	23	36	
Keramik cina tulang	Inggris	0,3–2	Medium	Sangat-banyak	30	–	–	–	Batu Cornwall 26 Debu tulang 44
Keramik cina Belleek	A.S Irlandia	Tidak	Medium-tinggi	Banyak	32	4	–	63	Frit 1
Porselen keras	Eropa Skandinavia	Tidak	Medium-tinggi	Banyak	50	–	25	25	
Peralatan batu	Inggris Eropa	Tidak	Medium-tinggi	Tidak	50		38	12	

Peralatan makan malam adalah sejenis alat makan berupa keramik putih dengan set lengkap yang terdiri dari piring dan mangkuk dengan desain seragam dan digunakan untuk makan malam. Klasifikasinya ditunjukkan dalam Tabel 4.15. Dalam tabel, Mojolica aslinya adalah nama untuk keramik tanah berkapur dari Itali dengan glasur tidak bening yang mengandung oksida timah, tetapi kini barang yang dihias dengan glasur tak bening juga umumnya diberi nama tersebut. Porselen cina sama kualitasnya seperti porselen, tetapi benda yang tak berglasur dibakar polos, kemudian diglasur dan dibakar sampai mengkilap. Porselen yang bersifat setengah gelas dibuat dengan pembakaran benda yang diglasur secara bening dan dalam satu kali bakar. Dalam porselen tulang, abu tulang atau kalsium fosfat ditambahkan kepada bahan dasar feldspar. Keramik cina Belleek adalah porselen berwarna putih-gading dan bahannya mengandung frit sebagai fluks.

3.2 Komposisi peralatan putih tri aksial

Dari ketiga bahan mentah pokok peralatan putih, lempung memberikan keplastisan dan kekuatan kering selama pembentukan, dan membentuk mulit dan fasa cair pada pembakaran. Felspar meleleh pada temperatur tinggi dan berperilaku sebagai fluks. Flint kurang reaktif meskipun sampai temperatur tinggi, dan memegang peranan sebagai pengisi untuk mempertahankan bentuk benda, tetapi dapat menjadi lelehan yang sangat kental pada temperatur tinggi. Komposisi khas dari berbagai benda tertera pada diagram fasa kesetimbangan fasa silika-leusit-mulit (Gb. 4.39). Titik konstitusi dari sistem terner dari lempung-felspar-flin terdapat dalam segi tiga yang menghubungkan silika, felspar kalium dan metakaolin. Perbedaan utama pencampuran berbagai produk adalah dari jenis lempung dan felspar dan perbandingan volumnya. Misalnya, bila banyaknya lempung dikurangi dan banyaknya felspar bertambah maka bahan akan terjadi vitrifikasi pada temperatur rendah, volume dari lelehan bertambah dan dicapai sifat tembus cahaya baik. Di lain pihak, dengan lebih

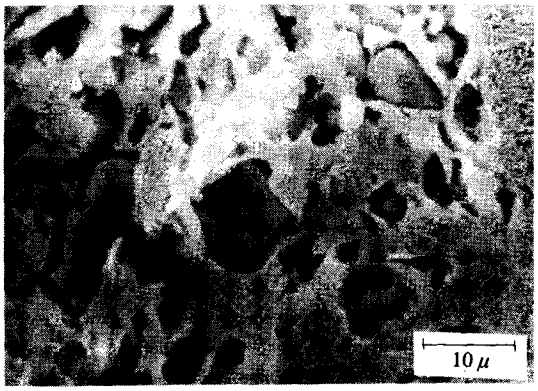


Gb. 4.39 Daerah komposisi tiga sumbu dari keramik putih menunjukkan diagram keseimbangan fasa dari silika-leusit-mulit (W. D. Kingery: Introduction to Ceramics, (1960), John Wiley & Sons).

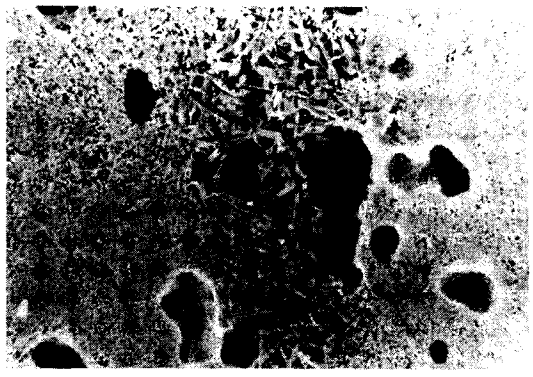
banyak lempung vitrifikasi tak terjadi sampai temperatur tinggi. Namun demikian karena banyak lempung, porselen mudah dibentuk, kekuatan mekaniknya baik ketahanan listriknya tinggi dan kehilangan induksinya kurang. Oleh karenanya kualitas dan kwantitas lempung yang digunakan merupakan faktor yang paling penting dalam penemuan metoda pembuatan produk.

Untuk gigi porselen diperlukan kebeningan tinggi. Komposisinya paling mendekati felspar menurut Gb. 4.39, karena kecil dalam ukuran dan secara relatif sederhana bentuknya. Di lain fihak, peralatan makan yang tipis dan hiasan yang bentuknya rumit dibuat dengan membubut dan mengecor. Untuk mendapatkan bentuk yang lebih baik, maka diperlukan lebih banyak lempung. Deformasi pada saat vitrifikasi dapat juga dihindari oleh kadar lempung yang tinggi.

Dalam bahan yang dibentuk, felspar yang relatif kasar dan partikel kuarsa didispersikan dalam matriks lempung yang halus. Felspar melebur pada kira-kira 1140°C, tetapi bentuknya dapat dipertahankan akibat viskositas yang tinggi. Pada kira-kira 1250°C akibat reaksi dengan lempung di sekitarnya, felspar yang halus hilang secara sempurna, dan dihasilkan mulit. Pada temperatur agak di atas 1000°C dihasilkan kristal mulit yang tidak bulat dan halus dalam lempung. Namun demikian, temperatur kira-kira 1250°C diperlukan untuk pertumbuhannya dan dapat dilihat di bawah mikroskop. Pada temperatur yang lebih tinggi lagi kristal mulit tumbuh terus. Sampai kira-kira 1250° tak ada perubahan menyolok yang dapat diamati pada partikel kuarsa tetapi permukaannya mulai meleleh pada temperatur yang lebih tinggi. Dengan bertambahnya temperatur, partikel berukuran kira-kira 20 mm melebur pada 1350°C, dan pada 1400°C hampir tak ada kuarsa yang tinggal, dan porselen terdiri hanya dari gelas dan mulit. Gb. 4.40 dan Gb. 4.41. menunjukkan mikrograf hasil elektron skan dari keramik batu dan porselen. Spesimennya diets dengan asam



Gb. 4.40 Mikrograf hasil elektron scan dari keramik batu diets dengan asam fluor.



Gb. 4.41 Mikrograf hasil elektron scan dari porselen diets dengan asam fluor.

fluorida untuk menghilangkan fasa gelas. Proselen terdiri hanya dari mulit dan gelas, fotograf menunjukkan kristal yang berkembang secara kusut dari mulit seperti jarum. Dalam keramik batu, kebanyakan partikel kuarsa tak larut, dan permukaannya tampak melebur. Selanjutnya, dengan mudah dapat diamati bahwa mulit halus berkembang menjadi partikel lempung, dan mulit yang lebih besar tumbuh pada tempat di mana semula terdapat partikel felspar.

4 | SEMEN, MORTAR, BETON

4.1 Definisi dan klasifikasi semen

4.1.1 Definisi dan klasifikasi

Semen adalah bahan anorganik yang mengeras pada pencampuran dengan air atau larutan garam. Contoh khas adalah semen portland (Tabel 4.16).

Untuk menghasilkan semen portland, bahan berkapur dan lempung dibakar sampai meleleh sebagian untuk membentuk klinker-yang kemudian dihancurkan, digerus dan ditambah dengan gips dalam jumlah yang sesuai. Bahan ini digunakan untuk berbagai pekerjaan teknik sipil dan bahan konstruksi. Ada banyak jenis semen portland dan mempunyai sifat berbeda-beda (Tabel 4.17): Semen penggunaan umum, semen pengeras pada panas sedang, semen berkekuatan awal yang tinggi, dan seterusnya. Semen kegunaan umum dipakai secara luas dalam pekerjaan umum dalam bidang konstruksi, yang merupakan bahan paling populer. Semen pengeras pada panas sedang mempunyai kalor hidrasi yang lebih rendah dari pada yang pertama digunakan dalam bidang yang memerlukan beton dalam jumlah besar, pekerjaan fondasi dari konstruksi raksasa seperti dam, jembatan besar, dan seterusnya. Semen berkekuatan awal yang tinggi adalah semen berkadar Ca_3SiO_5 yang tinggi, dan mempunyai waktu set yang pendek. Bahan ini digunakan untuk pekerjaan yang memerlukan pengesetan cepat atau pekerjaan di daerah dingin.

Tabel 4.16 Semen.

Macam	Penggunaan utama
Semen Portland:	Teknik sipil, konstruksi
Semen penggunaan umum	〃
Semen pengeras pada panas sedang	〃
Semen berkekuatan tinggi awal	〃
Semen panas rendah	〃
Semen tahan sulfat	Konstruksi pelabuhan, lautan
Semen campuran:	
Semen tanur tinggi	Teknik sipil, konstruksi
Semen Pozzolanik	〃
Semen abu terbang	〃
Semen khusus	
Semen alumina	Bahan tahan api
Semen jet	Pekerjaan penting
Semen gigi	Penggunaan kedokteran

Tabel 4.17 Klasifikasi semen portland utama.

Semen (jenis)	Sifat-sifat	Penggunaan utama
Semen penggunaan umum (Jenis I)	MgO, SO_3, hilang pada pembakaran. Kehalusan, pengesetan dan kekuatan secara berturut-turut juga ditentukan. Secara umum mempunyai sifat umum dari semen.	Digunakan secara luas sebagai semen umum untuk teknik sipil & konstruksi arsitektur.
Semen pengeras pada panas sedang (Jenis II)	Ditentukan untuk mempunyai C_3S kurang dari 50% dan C_3A kurang dari 8%. Kalor hidrasi 70 kal/g atau kurang (7 hari) dan 80 kal/g atau kurang (28 hari) pada kondisi sedang. Peningkatan dari kekuatan jangka panjang diinginkan.	Secara umum dipakai untuk beton masif yang besar. Pekerjaan dasar untuk bendungan, jembatan besar, bangunan-bangunan besar.
Semem berkekuatan tinggi awal (Jenis III)	Mengandung C_3S maksimum dan gipsum secukupnya untuk pengendalian pensetan. Kekuatan awal (1 hari, 3 hari) diintensifkan, ditentukan untuk mempunyai kekuatan di atas 40 kg/cm^2 selama penekanan 1 hari dan di atas 90 kg/cm^2 selama penekanan 3 hari.	Menggantikan semen penggunaan umum untuk pekerjaan yang mendesak. Cocok untuk pekerjaan di musim dingin. Untuk konstruksi bangunan, pekerjaan pembuatan jalan, dan produk semem.
Semen panas rendah (Jenis IV)	Kalor hidrasi lebih rendah 10 kal/g dari pada semen pengeras pada panas sedang, ditentukan di bawah 60 kal/g (7 hari) dan di bawah 70 kal/g (28 hari) (ASTM). Memberikan kalor hidrasi minimum seperti semen untuk pekerjaan bendungan.	Sama dengan semen jenis II.
Semen tahan sulfat (Jenis V)	Ditentukan untuk mempunyai C_3S di bawah 50% dan C_3A di bawah 5% (ASTM). Diusahakan agar kadar C_3A minimum untuk memperbesar ketahanan terhadap sulfat.	Dipakai untuk pekerjaan beton dalam tanah yang mengandung banyak sulfat & yang berhubungan dengan air tanah. Pelapisan dari saluran air dalam terowongan dst.

C_3S: Larutan padat dari Ca_3SiO_5, C_3A: Larutan padat dari $Ca_3Al_2O_6$

4.2 Mortar dan beton

4.2.1 Definisi

Mortar dan beton dibuat dari semen dan agregatnya yang dicampur dengan air. Agregat mencakup pasir sungai, kerikil sungai atau makadam dan sebagainya, dan dibagi ke dalam agregat kasar dan halus menurut ukuran butirannya. Umumnya pengayakan dengan 5 mm mesh diterapkan sebagai standar. Bagian yang lewat saringan sebanyak 85% atau lebih disebut agregat halus, dan bagian yang tinggal di saringan disebut agregat kasar. Bila agregat hanya terdiri dari agregat halus saja, disebut mortar semen atau mortar saja, dan bila mengandung agregat yang kasar disebut beton.

4.2.2 Mortar

Mortar digolongkan menurut penggunaannya, misalnya untuk sambungan, tembok, tahan air, tahan api, dan seterusnya.

Mortar untuk sambungan digunakan untuk menyambung bata, batu dan blok

beton. Perbandingan semen dan pasir adalah 1: 2 atau 1: 3 dan banyaknya kapur mati ekuivalen dengan 20% dari semen yang ditambahkan. Mortar tembok yang dipergunakan dalam berbagai perbandingan campuran untuk memenuhi keperluan pekerjaan. Pekerjaan dengan mortar tembok berlangsung menurut urutan berikut ini: Pelapisan dasar, penghalusan, pelapisan kedua dan penyelesaian. Dalam setiap tahap perbandingan pencampuran mortar disesuaikan menurut jenis dasar dan tempat pelapisan (Tabel 4.18).

Tabel 4.18 Penggunaan dan penyiapan mortar.

Dasar	Tempat pelapisan	Lapisan ke 1 semen: pasir	Lapisan ke 2 semen: pasir	Lapisan akhir semen: pasir: kapur
Beton	Lantai	–	–	1:2
	Dinding dalam	1:2	1:3	1:3:0,3
	Langit-langit, atap	1:2	–	1:3:0,3
	Dinding luar, dst.	1:2	1:3	1:3
Bata	Lantai	–	–	1:2
	Dinding dalam	1:3	1:3	1:3:0,3
	Langit-langit, atap	1:2	–	1:3:0,3
	Dinding luar, dst.	1:3	1:3	1:3
Bilah logam (Bilah rata) Bilah rusuk Bilah kawat	Dinding dalam	1:3	1:3	1:3:0,3
	Langit-langit	1:2	1:3	1:3:0,3
	Dinding luar, dst.	1:3	1:3	1:3
Kayu Semen lembaran	Dinding dalam	1:2	1:3	1:3:0,3
	Dinding luar, dst.	1:2	1:3	1:3
Tegel	Dinding luar	1:2	–	1:3

4.2.3 Beton

Sifat beton berubah karena sifat semen, agregat dan air, maupun perbandingan pencampurannya. Untuk mendapatkan beton optimum pada penggunaan yang khas, perlu dipilih bahan yang sesuai dan dicampur secara tepat.

(1) Bahan

(a) Semen

Berbagai semen dengan berbagai sifat dibuat seperti telah dikemukakan di atas. Pemilihan semen secara optimum perlu dilakukan untuk memenuhi keperluan yang diminta (Tabel 4.17).

(b) Agregat

Ada pasir alam, makadam yang dibuat dengan memecah kerikil alam, batu, pasir halus, juga agregat buatan dari slag tanur tinggi berupa agregat kasar dan agregat buatan yang ringan. Agregat menempati 65–80% volum total dari beton, sifat-sifatnya sangat mempengaruhi kualitas beton. Agregat yang baik seharusnya mempunyai sifat-sifat sebagai berikut:

1) Keras dan kuat
2) Bersih
3) Tahan lama

4) Masa jenis tinggi
5) Butir bulat
6) Distribusi ukuran butir yang cocok, dan sebagainya.

Untuk beton masa jenis rendah diperlukan agregat buatan.

(c) Air dan bahan campuran

Beton menjadi keras karena reaksi antara semen dan air. Oleh karena itu, air yang dipakai untuk mencampur kadang-kadang mengubah sifat semen. Kalau dipakai air sekarang bukan air ledeng bersih atau sebangsanya, maka perlu diperiksa terlebih dahulu apakah air itu cocok untuk dipakai sebagai campuran beton apa tidak. Cara berikut ini dipergunakan untuk pemeriksaan tersebut: Waktu set semen dan kekuatan tekan diukur untuk mortar yang dicampur dengan air bersih dan yang dicampur dengan air yang diuji, hasil pengukurannya dibandingakan. Sedangkan air laut hanya dapat dipakai untuk beton yang tidak mempergunakan baja tulangan karena mengandung garam yang dapat menyebabkan baja berkarat.

Bahan campuran ditambahkan dengan maksud agar dapat memperbaiki sifat beton yang lemah dan mengeras. Bahan campuran dapat dibagi menjadi dua kelompok: yang pertama ialah bahwa volume yang ditambahkan harus diperhitungkan pada pengadukan beton dan yang ditambahkan tidak perlu diperhitungkan. Yang pertama disebut bahan campuran dan yang kedua disebut zat campuran.

Ada beberapa macam bahan campuran. Contoh khas adalah bahan yang memiliki sifat hidrolik tersembunyi seperti pozolan, abu terbang, slag tanur tinggi, dan berbagai bahan penambah.

Tabel 4.19 Campuran semen dan pengaruhnya.

Campuran	Aksi	Pengaruh
Zat AE	Membuat busa seragam dengan diameter 0,25–0,025 mm	Peningkatan dari kemudahan kerja
Zat pendispersi (Zat penghilang air)	Dispersi dari partikel semen	"
Zat pengeras cepat	Pemercepatan hidrasi	Penguatan awal
Pelambat pengesetan	Memperlambat hidrasi	Pengendalian waktu pengesetan
Zat tahan air	Membuat struktur padat dan tolak air	Pengaruh tahan air

Ada beberapa jenis zat campuran yang digolongkan menurut fungsinya seperti dijelaskan dalam Tabel 4.19. Zat pembawa dipakai untuk memperbaiki kemampuan-puan pengerjaan dengan mencampur sejumlah optimum udara ke dalam beton. Termasuk ke dalam golongan ini ialah resin vinol dibuat dari tar hidrokarbon dietsrak dari pohon pinus, dan Darex, komponen utamanya adalah trietanolamin dan hidrokarbon sulfonat. Resin vinsol dibuat menjadi larutan 20% dan ditambahkan ke dalam semen 0,03–0,06 persen berat. Zat untuk pendispersi (Zat penghilang air) dipergunakan untuk mencegah tersetnya partikel dalam semen. Kalau zat ini dibubuhkan kepada beton, kecairan beton bertambah. Lingnin sulfonat dan turunannya, sulfonat dari poliakohol tinggi asam oksikarbonat dan garamnya, kondensat tinggi dari asam sulfonat naftalin, formaldehid. Garam kondensat tinggi dari asam sulfonat melamin dan sebagainya termasuk golongan zat tersebut di atas.

4.3 Sifat-sifat beton

4.3.1 Perancangan campuran beton

Maksud perancangan adalah untuk menentukan perbandingan campuran bahan untuk mendapat beton dengan sifat yang diperlukan dan paling murah. Sifat yang diminta tergantung pada penggunaan beton. Sifat-sifat yang dapat diatur oleh perbandingan campuran adalah kekuatan, ketahanan kedap air dan kemampuan pengerjaan. Ada dua jalan dalam menghitung perbandingan campuran yang diperlukan. Pertama, tentukan perbandingan campuran kira-kira dengan mempergunakan teori perbandingan air semen, atau hukum Lyse, kemudian campuran diuji. Kedua, buat campuran beton secara empiris mempergunakan tabel campuran atau perkiraan berdasarkan rongga cacat dalam agregat. Teori perbandingan air-semen menentukan kekuatan beton kalau persyaratan di bawah ini dipenuhi:

1) Kualiats dan cara pengujian semen adalah sama,
2) Kekuatan agregat lebih tinggi dari pada pasta
3) Beton sangat mampat dan
4) Beton dapat diolah dan plastis.

Makin kecil perbandingan air-semen makin tinggi kekuatan beton. Hukum Lyse menunjukkan bahwa satuan volume air untuk memberikan adukan sama adalah tetap bagi beton dengan agregat tertentu.

4.3.2 Sifat-sifat beton

Pengolahan yang mudah merupakan sifat yang perlu bagi beton yang belum mengeras. Sifat ini dapat diamati dengan uji penurunan. Kerucut baja diameter dalam 10 cm di bagian atas dan diameter dalam bagian bawah 20 cm tingginya 30 cm diisi beton. Kemudian kerucut penurunan diangkat dan penurunan beton bagian atas diukur dalam cm. Harga penurunan yang diperlukan tergantung pada struktur dan proses pengolahan konstruksi beton. untuk struktur dengan baja penguat yang sedikit dan berbentuk sederhana seperti pada dam dan jalan, biasanya dipakai harga penurunan yang kecil, sedangkan untuk struktur berbentuk rumit seperti pada bangunan, dipakai beton dengan harga penurunan yang besar.

Sifat yang paling penting dari beton yang telah diset adalah sifat mekanik. Kekuatan tekan beton dapat diukur dan diamati pada spesimen berumur 1,4 dan 13 minggu. Kekuatan tekan beton dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti perbandingan air-semen, sifat semen, jenis agregat temperatur kur, dst. Dengan perbandingan air-semen yang kecil dapat diperoleh beton yang memiliki kekuatan tinggi. Kalau beton dikur pada temperatur rendah, kekuatannya rendah pada awalnya, tetapi setelah waktu yang lama cenderung menjadi lebih tinggi apabila dibandingkan dengan hasil kur pada temperatur tinggi. Tabel 4.20 menunjukkan hubungan antara kekuatan

Tabel 4.20 Kekuatan tekan, kekuatan lentur, kekuatan tarik dari beton.

Kekuatan	Kekuatan beton (kg/cm^2)								
Kekuatan tekan	70	140	210	280	350	420	490	560	630
Kekuatan lentur	16,2	26,4	34,0	40,7	47,5	53,7	60,0	65,3	71,0
Kekuatan tarik	7,7	14,0	19,3	24,8	28,0	32,3	36,5	40,7	44,3

tekan, kekuatan lentur dan kekuatan tarik dari beton. Beton yang memiliki kekuatan tekan tinggi menujukkan juga kekuatan lainnya yang tinggi.

4.4 Produk semen dan produk beton

4.4.1 Produk semen diperkuat serat

Semen mempunyai kekuatan tekan yang tinggi tetapi kekuatan tariknya rendah. Kalau bahan serat dibubuhkan sebagai penguat, kekurangan tersebut di atas dapat diperbaiki, sehingga memungkinkan membuat lembaran tipis, pelat dan pipa. Serat yang dipergunakan sebagai penguat adalah serat asbes, serat gelas tahan alkali, serat alumina, serat karbon, serat baja karbon, nilon, poliester, kapas, dsb.

Produk semen yang diperkuat asbes umumnya mengandung 15% asbes. Produk utamanya adalah lembaran tipis untuk atap, bahan bangunan bagian luar dan bagian dalam, pipa untuk cerobong, saluran udara, pipa air, dsb.

Produk semen yang diperkuat serat gelas disebut semen diperkuat gelas (GRC). Jenis ini adalah khas semen diperkuat serat buatan. Serat gelas yang dipergunakan harus tahan alkali. Untuk ini diambil gelas tahan alkali yang mengandung ZrO_2 17%.

4.4.2 Beton otoklaf ringan (ALC)

Beton jenis ini beton ringan berbusa yang dikur di bawah kondisi hidrotermal pada 180°C bertekanan 10 atmosfir. Bubur dengan zat pembusa dituangkan ke dalam batang baja tahan karat yang dipasang terlebih dahulu, dipotong beberapa jam kemudian, dan diproses dalam otoklaf. Karena ALC mengandung banyak busa, maka massa jenisnya menjadi kira-kira 1/4 dan konduktivitas termalnya kira-kira 1/10 dari beton biasa. Beton macam ini baik sekali peredaman suaranya dan tahan api, biasanya dipergunakan bentuk bangunan rendah dan setengah tinggi.

5 | GELAS

5.1 Pendahuluan (Difinisi dan klasifikasi)

Gelas adalah zat padat amorf terbentuk sewaktu transformasi dari cair menjadi kristal. Titik transisi termodinamika yang disebut titik transisi gelas memisahkan gelas dari cairan dingin lanjut. Tidak seperti keadaan kristal di sini tidak ada keteraturan jarak panjang dalam konfigurasi atomnya tetapi hanya ada keteraturan jarak pendek. Konfigurasi atom jarak pendek ini serupa dengan yang ada pada kristal yang mempunyai komposisi kimia sama dari gelas itu.

Gelas dapat diklasifikasikan menurut penggunaannya sebagai bahan (Tabel 4.21), juga dapat diklasifikasikan menurut komposisi kimia, gelas kapur soda, gelas borosilikat, gelas halogenida, gelas khusus, dst.

5.2 Komposisi kimia

5.2.1 Gelas lembaran

Gelas lembaran termasuk gelas kapur soda. Komponen utamanya adalah SiO_2, Na_2O dan CaO, dan Al_2O_3, MgO dan SO_3 sebagai subkomponen. Komposisi gelas lembaran seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4.22, agak berbeda-beda tergantung cara produksinya. Hal ini disebabkan oleh perbedaan dalam viskositas yang diperlukan untuk berbagai proses pencetakan.

5.2.2 Gelas wadah

Banyak macam gelas wadah dan komposisi kimianya juga berbeda-beda pada daerah yang luas. Seperti ditunjukkan pada Tabel 4.23, komponen kimia botol yang diproduksi secara otomatik adalah gelas kapur soda. Peralatn makan dapat digolongkan pada gelas kapur soda dan gelas timbal. Yang pertama dipakai untuk piring dan mangkuk yang dibuat dengan mesin pres, dan untuk produksi masa dibuat oleh mesin otomatik cetak, sedangkan yang kedua dipakai untuk peralatan dibentuk dengan peniupan tangan dan untuk berbagai benda kerajinan. Tabel 4.24 menunjukkan komponen kimia utama dari produk tersebut di atas.

5.2.3 Gelas optik

Lebih dari 200 macam gelas optik dapat diperoleh. Jenis itu dilukiskan pada Gb. 4.42 terhadap indeks bias N_d (pada garis d dari Na, panjang gelombang 587.6 mμ) dan bilangan Abbe v. Bilangan Abbe juga disebut dispersi relatif ditentukan sebagai berikut:

Tabel 4.21 Klasifikasi gelas berdasarkan penggunaannya.

Macam	Nama	Penggunaan
Gelas rata: Gelas rata umum Gelas rata khusus Gelas rata berbentuk	 Gelas rata biasa, gelas rata berukir, gelas lebar Gelas kawat, gelas penyerap panas Gelas beralur, gelas kerut berkawat	 Kaca jendela, cermin
Gelas wadah: Gelas peralatan makan	Botol bermulut lebar, botol bermulut sempit Gelas, gelas bergagang, piring, mangkuk	Berbagai wadah
Gelas optik:	Gelas mahkota (crown), gelas batu api (flint), gelas barium, gelas lantan, gelas fosfat, gelas yang mengandung fluor	Berbagai instrumen optik
Gelas fisikokimia: Gelas umum Gelas kedokteran untuk termometer	Gelas kuarsa, gelas borosilikat, gelas silikat tinggi, gelas ampul, gelas botol obat	Untuk penggunaan fisiko kimia dan kedokteran
Gelas listrik: Gelas penerangan Gelas tabung elektronik Gelas alat listrik berat	 Gelas penerangan, gelas lampu fluoresensi, gelas lampu busur merkuri, lampu uap natrium Gelas untuk tabung sinar katoda, tabung pemancar, tabung sinar-X dan tabung khusus Gelas mikaleks, gelas isolator gelas	 Peralatan listrik
Gelas pengkapsul:		Berbagai pengkapsulan
Serat gelas:	Gelas monofilamen, gelas filamen panjang, gelas untuk komunikasi foto	Isolator, komunikasi foto

Tabel 4.22 Komposisi kimia dari gelas rata.

Jenis	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	SO_3
Produk A Produk B	71,82 71,76	1,40 0,80	0,07 0,10	3,31 2,41	8,90 11,55	14,27 12,65	0,31 0,47
Gelas lembaran	71–73	0,5–1,5	–	1,5–3,5	8–10	14–16	–
Gelas lembaran dirol	70,5–73	0,5–1,5	–	0–1	13–14	12–14	–

Tabel 4.23 Komposisi kimia gelas untuk botol.

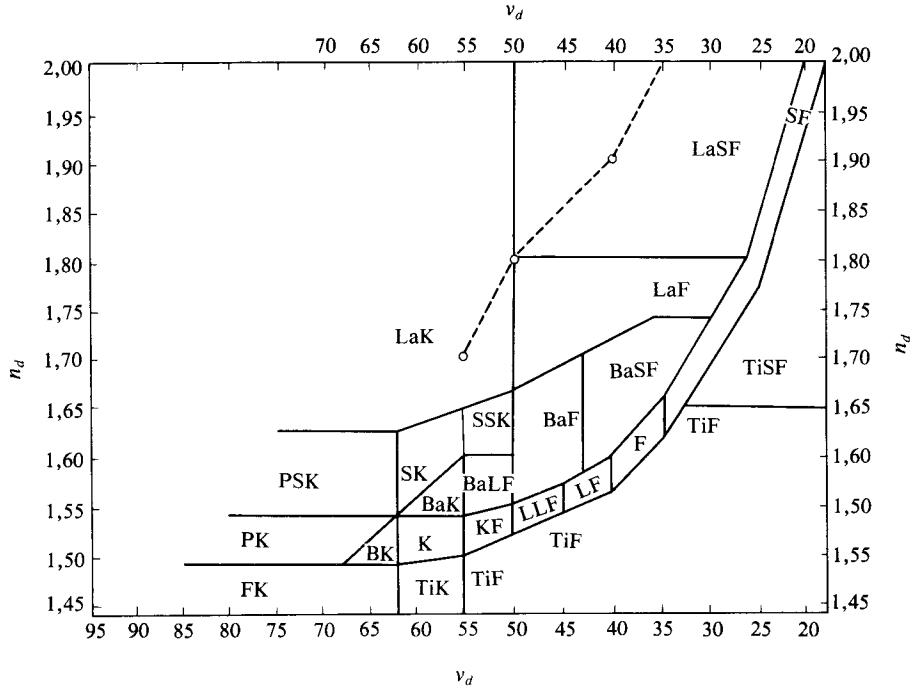
Jenis	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	SO_3	BaO	F_2	B_2O_3
Tak berwarna (kalsit)	72,3	1,86	0,60	0,17	10,63	13,46	0,54	0,31	0,55	0,25	
Tak berwarna (Dolomit)	73,3	1,93	0,37	3,76	5,82	14,07	0,46	0,23	0,34	0,06	0,04
Amber	72,5	1,45	0,09	3,77	7,34	13,71	0,61		0,29	0,26	

Tabel 4.24 Komposisi kimia gelas wadah.

Jenis	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	SO_4	BaO	F_2	B_2O_3	PbO
Gelas presan	74,67	0,38	0,04	–	5,14	19,14	0,41	–	–	–	–	–
	75,13	0,41	0,04	–	5,68	16,41	1,11	–	1,11	–	–	–
Gelas kristal timbal	67,2	–	–	–	0,9	9,5	7,1	–	–	–	–	14,8
	51,1	0,5	–	–	–	1,7	7,6	–	–	–	–	38,3

Tabel 4.25 Komposisi kimia gelas optik.

Penggolongan		SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	CaO	BaO	TiO_2	ZnO	PbO	As_2O_3	La_2O_3	ThO_2	ZrO_2	Ta_2O_5	CdO
Gelas	BK7	68,9	10,1	–	8,8	8,4	–	2,8	–	–	–	1,0					
Crown	ZK1	55,7	7,0	–	1,0	16,0	–	–	–	20,0	–	0,3					
Gelas	SF13	34,2	–	0,6	1,6	1,9	–	–	4,5	–	56,7	0,5					
flint	LF7	53,9	–	–	2,5	7,9	–	–	–	–	34,9	0,6					
Gelas	$BaSF_4$	38,1	–	–	3,0	3,8	–	17,4	–	5,5	31,4	0,8					
barium	BaF_4	45,5	1,0	–	0,5	7,3	–	15,8	–	8,0	22,5	0,4					
Gelas	LaK	14,8	27,0	1,3	–	–	–	36,5				0,5	20,0				
lantan	LaSF	2,0	24,5	–	–	–	–	–	–	–	–	0,5	35,0	19,3	1,5	12,0	5,5
Gelas fluorin	FK	51,0	18,3	8,3	–	7,3	KHF_2 14,4 P_2O_5	MgO				0,2					
Gelas fosfat	PKS	–	4,0	9,0	–	11,6	70,4	4,0				1,0					



PSK, PK: Gelas mahkota. BaF, BaK, SSK, BaLF, SK, BaSF: Gelas barium. SF, KF: Gelas flint. LaK, LaF, LaSF: Gelas lantan. TiF, TiSF, TiK: Gelas khusus mengandung fluor

Gb. 4.42 Distribusi dari n_d, ν_d bagi gelas optik.

$$\nu = \frac{N_D - 1}{N_F - N_C}$$

di mana N_F indeks bias untuk panjang gelombang 486,1 mμ dalam spektrum hidrogen, N_C indek bias untuk panjang gelombang 626,3 mμ juga dalam spektrum hidrogen. Dalam gambar tersebut PSK dan PK adalah untuk gelas mahkota dan BaF, BaK, SSK, BaLF, SK dan BaSF adalah untuk gelas barium. SF dan KF adalah untuk gelas flint, LaK, LaF dan LaSF untuk gela lantanum, dan TiF, TiSF, TiK untuk gelas khusus mengandung fluorida (Tabel 4.25).

5.2.4 Gelas fisikokimia dan gelas kedokteran

Gelas yang dipergunakan dalam bidang fisikokimia dan bidang kedokteran harus memiliki ketahanan kimia yang tinggi, tahan panas dan tahan kejut termal yang baik. Bahan yang mempunyai sifat tersebut adalah gelas kuarsa, gelas silikat tinggi, gelas borosilikat dan gelas aluminosilikat (Tabel 4.26).

5.2.5 Gelas listrik

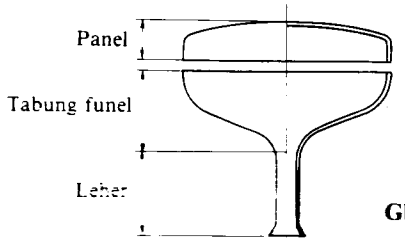
Gelas yang utamanya untuk penerangan yaitu untuk bola lampu dan lampu fluoresen. Gelas kapur soda dipakai untuk bola lampu dan gelas timbal yang berkadar 20–30% PbO dipakai untuk komponen bagian dalam. Gelas kapur soda yang dipakai

Tabel 4.26 Komposisi kimia dari gelas fisikokimia, gelas borosilikat, gelas aluminosilikat.

Jenis		SiO_2	B_2O_3	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Na_2O	K_2O
Gelas borosilikat	1	80,9	12,7	2,3	0,03	–	–	4,0	0,04
	2	81	13	2	–	–	–	4	
	3	80,0	12,0	3,0	–	–	–	5,0	
Gelas aluminosilikat		55,3	7,4	22,9	–	4,7	8,5	0,6	0,4
		60,1	5,1	18,5	–	7,3	7,9	1,1	

Tabel 4.27 Komposisi kimia dari gelas listrik.

Jenis	SiO_2	Al_2O_3	Na_2O	K_2O	Li_2O	CaO	MgO	BaO	PbO
Untuk bola lampu:									
Bola lampu	73,5	1,0	17,2	–	–	5,4	3,7	–	–
Komponen pengkapsulan	63,1	0,3	7,9	5,5	–	1,0	–	–	20,2
Untuk tabung sinar katoda:									
Panel	64,5	5,3	7,0	6,4	1,5	2,5	–	12,8	–
Tabung leher	48,0	4,0	1,5	12,0	–	2,5	–	–	32,0



Gb. 4.43 Tabung sinar katoda.

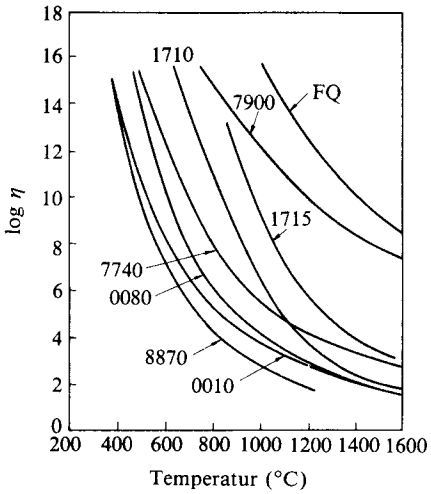
juga untuk lampu fluoresen (Tabel 4.27).

Untuk tabung sinar katoda, dipakai gelas yang kurang berubah warna oleh sinar elektron dan sinar-X, dan mempunyai absorpsi sinar X yang tinggi seperti ditunjukkan pada Gb. 4.43 tabung sinar katoda terdiri dari panel, tabung funel dan leher, masing-masing dipergunakan gelas yang komposisi kimianya berbeda. Untuk panel dipakai gelas yang mengandung BaO, SrO, PbO, dst, dengan sifat koefisien absorpsi massa yang tinggi untuk sinar-X, dan untuk tabung funel dipakai gelas yang mengandung PbO kira-kira 20% atau yang mengandung PbO dan SrO. Untuk tabung leher dipalai gelas yang mengandung PbO, SiO dan K_2O sebagai komponen utama. Gelas ini mempunyai voltase putus yang tinggi dan tahanan listrik yang tinggi.

5.3 Sifat dan penggunaan

5.3.1 Sifat termal dan penggunaan

Kalau gelas dipanaskan, tidak seperti halnya bahan berkristal, viskositasnya perlahan-lahan menurun, dan akhirnya mencair. Viskositas gelas berubah menurut temperatur (Gb. 4.44) maka temperatur yang berhubungan dengan viskositas spesifik



FQ: gelas kuarsa, 7900: Vycor, 1715: aluminosilikat untuk penyelubungan W, 1710: aluminosilikat, 7740: Pyrex, 0080: gelas kapur-soda, 8870: gelas timbal tinggi, 0010: gelas timbal-soda-kalium. η: viskositas (poise)

Gb. 4.44 Hubungan temperatur dan vikositas bagi gelas praktis.

ditetapkan, dan dipakai sebagai petunjuk proses produksi seperti fusi, pencetakan dan penganilan. Ada titik regangan (viskositas $\eta=10^{13}$ poise), titik pelunakan ($\eta=4{,}5\times10^{7}$ poise) dan titik alir ($\eta=10^{5}$ poise), dst.

Berbagai bentuk teori dan empiris telah disarankan untuk perubahan viskositas η terhadap temperatur

$$\log\eta=A_3+\frac{B}{T-T_0} \tag{4.13}$$

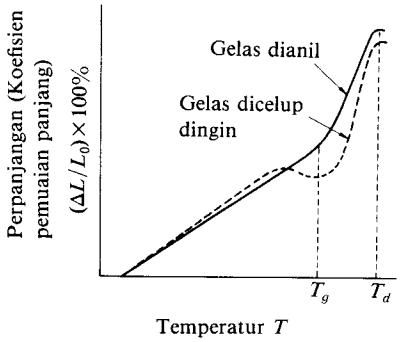
Ini adalah persamaan empiris dari Fulcher, di mana A_3, B dan T_0 merupakan konstanta yang berubah menurut komposisi gelas.

Kalau gelas dipergunakan dalam temperatur tinggi, temperatur pelunakannya dapat dijadikan patokan sebagai tahanan termal. Akan tetapi karena viskositas gelas berubah secara kontinu oleh perubahan temperatur seperti dijelaskan di atas, maka mungkin terjadi deformasi melar walaupun berada pada atau di bawah temperatur pelunakan.

Koefisien muai panjang bahan gelas adalah sifat yang penting dalam mengevaluasi tahanan terhadap kejutan termalnya. Seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.45, kurva muai panjang gelas berbeda antara yang dianil dan yang dicelup dingin. Tetapi pada umumnya, ada dua titik belok ialah T_g dan T_d, T_g disebut temperatur transisi dan T_d disebut temperatur deformasi. Koefisien pemuaian panjang berubah jelas pada temperatur transisi itu.

Koefisien pemuaian panjang rata-rata α berubah karena komposisi gelas sampai di sekitar temperatur transisi dan hubungan secara empiris adalah:

$$\alpha=\sum^{n}A_nP_n \tag{4.14}$$



Gb. 4.45 Kurva pemuaian termal dari gelas.

Tabel 4.28 Koefisien pemuaian panjang beberapa gelas.

Jenis gelas	Koefisien pemuaian panjang $\alpha\times 10^7$	Temperatur (°C)
Gelas Vycor, Corning 7900	7,8	200–900
Gelas Pyrex, Corning 7740	33	0–300
Gelas tahan panas, Jena 1447[III]	50	20–100
Gelas rata	99	19–461
	373	563–579
Gelas botol	92	0–400
Gelas anggur	98	0–400
Gelas kristal	117	0–350

di mana A_n disebut faktor koefisien pemuaian yang konstan bagi setiap komponen, dan P_n persentase berat setiap komponen.

Koefisien pemuaian panjang bahan gelas yang diperdagangkan ditunjukkan dalam Tabel 4.28. Pada umumnya bahan gelas yang mempunyai koefisien pemuaian panjang kurang dari 50×10^{-7} dipakai sebagai gelas tahan panas. Untuk memperbaiki tahanan kejutan termal penguatan bahan gelas memberikan pengaruh sangat efektif yang akan dijelaskan pada pembahasan sifat-sifat mekanik.

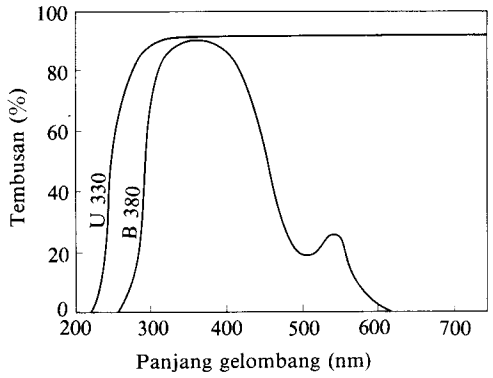
5.3.2 Sifat optik dan penggunaannya

Kalau gelombang cahaya dengan panjang gelombang dari 380 sampai 770 mm yang disebut cahaya tampak menembus gelas, cahaya dengan panjang gelombang tertentu diserap. Hal ini akan memberikan warna tertentu pada gelas yang terlihat oleh mata. Hubungan antara intensitas sumber cahaya I dan cahaya I_0 yang diteruskan melalui gelas adalah sebagai berikut:

$$I=I_0\,(1-R)^2e^{-\alpha d} \tag{4.15}$$

di mana R adalah pantulan pada bidang gelas, α adalah koefisien absorpsi dan d ketebalan gelas. I/I_0 disebut tembusan. Ion logam transisi dan ion unsur tanah jarang memberikan warna tertentu pada gelas. Unsur tersebut adalah: Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co. Ni, Cu, Mo, Rh, Ce, Pr, Hd, Pm, Eu, Ho, W, Pt, U dst. Sebagai tambahan gelas diwarnai juga oleh koloid logam. Gelas ruby oleh koloid emas disebut gelas emas ruby yang telah bersejarah lama dalam hal gelas seni.

Gelas berwarna dipakai untuk berbagai alat optik sebagai saringan. Gb. 4.46 menunjukkan contoh kurva tembusan dari saringain gelas. Saringan sinar UV



Gb. 4.46 Kurva tembusan spektrum dari gelas filter.

menyerap lengkap cahaya yang berpanjang gelombang lebih pendek dari beberapa panjang gelombang tertentu di daerah ultra lembayung. Saringan biru B-380 menunjukkan penyerapan pada 450–700 mm dari daerah tampak. Sejumlah banyak saringan yang memiliki kurva penyerapan dibuat dan dipakai umumnya pada alat potret sebagai saringan kontras, saringan pembetul dan saringan transformasi warna-temperatur juga yang khusus seperti saringan tembusan UV, saringan serapan UV, saringan serapan infra merah, dst.

5.3.3 Sifat mekanik gelas dan penggunaannya

Gelas mempunyai sifat khas yaitu getas pada temperatur kamar. Sesuai dengan itu kekuatan mekaniknya tergantung pada ukuran retakan Griffith. Telah dikenal bahwa kekuatan patah dari bahan gelas tanpa retakan Griffith mendekati teoritisnya yang diturunkan dari kekuatan ikatan kimia dalam gelas, yaitu kekuatan lentur gelas kuarsa yang diperkirakan tanpa retakan Griffith berkisar 570 kg/mm^2. Gelas yang diperdagangkan memiliki retakan Griffith dan kekuatan mekaniknya sekitar 1/100 kekuatan teoritisnya.

Gelas retak akibat pertumbuhan retakan Griffith yang disebabkan tegangan tarik pada permukaannya. Oleh karena itu, kalau tegangan tekan diberikan pada permukaan gelas, tegangan tarik yang datang dari luar dapat dikurangi sebesar tegangan tekan yang ada. Sebagai akibatnya kekuatan mekanik dari gelas itu meningkat. Gelas yang ditemper berdasarkan prinsip ini, yang dibagi menjadi dua jenis yaitu bagi gelas yang ditemper secara fisik dan yang ditemper secara kimia.

Penemperan gelas secara fisik dilakukan dengan mengeluarkan gelas yang dipanaskan dari tungku secara cepat dan mendinginkan permukaannya dengan semprotan udara. Maka terjadi tegangan sisa oleh perbedaan temperatur antara bagian permukaan dan bagian dalam gelas. Penemperan fisik gelas sangat memperbaiki tahanan kejut termal dan tahanan impak dibandingkan dengan gelas yang tidak ditemper.

Penemperan gelas secara kimia dilakukan dengan membentuk tegangan tekan pada permukaan melalui berbagai cara kimia. Yaitu termasuk cara dealkalisasi pada permukaan, penutupan dengan gelas yang memiliki koefisien pemuaian termal lebih kecil dan penukaran ion antara ion logam alkali, dan sebagainya.

Ada proses temperatur tinggi dan proses temperatur rendah dalam penukaran ion antara logam alkali. Pada proses temperatur tinggi, gelas yang mengandung ion Na^+ dan K^+ dicelupkan ke dalam garam litium cair, pada temperatur di bawah temperatur pelunakan untuk Na^+, terjadi reaksi penukaran $K^+ \rightleftarrows Li^+$. Permukaan gelas menjadi

kaya oleh Li yang mengakibatkan koefisien pemuaiannya lebih rendah dibandingkan dengan bagian dalamnya di mana tidak terjadi penukaran ion. Kalau gelas didinginkan ke temperatur kamar, perbedaan antara koefisien muai antara permukaan dan bagian dalam mengakibatkan tegangan tekan pada permukaan maka gelas menjadi kuat.

Kalau ion alkali di dalam gelas diganti oleh ion alkali yang radius ionnya lebih besar pada temperatur di bawah temperatur transisi, maka terjadi tegangan tekan pada permukaan gelas setelah didinginkan ke temperatur kamar. Ini adalah proses penukaran ion pada temperatur rendah, penukarannya adalah $Li \rightleftarrows Na$, $Na \rightleftarrows K$.

Peenguatan secara fisik cocok bagi bentuk yang sederhana seperti pada gelas rata, gelas minum dst. Penguatan penukaran ion dapat dilakukan terhadap bentuk yang rumit seperti perkakas gelas untuk laboratorium atau dalam pengguanaan di bidang kedokteran.

6 EMAIL

6.1 Pendahuluan

Produk email adalah benda yang permukaan logamnya dilapisi oleh gelas anorganik. Bubuk gelas diletakkan pada permukaan dan dipanaskan untuk membuat pelapisnya. Email diterapkan pada logam magnesium, aluminium, baja lunak, besi cor, baja tahan karat dan paduan lain yang tahan panas. Permukaan logam ditutup oleh gelas, yaitu salah satu bahan keramik yang khas, mempunyai sifat unggul dalam ketahanan terhadap zat kimia, tahan panas dan tahan aus.

Email dapat digolongkan menurut logam dasarnya; email besi email aluminium, email baja tahan karat, email tembaga, email emas dan perak dan seterusnya.

Pelapisan keramik berbeda dari email biasa. Hal ini akan memperbaiki kualitas permukaan dari bahan dengan penutupan permukaan berbagai bahan oleh keramik seperti oksida, nitrida, borida dan silisida, dan dapat mencakup email dalam arti luas. Keramik yang digunakan untuk pelapisan permukaan adalah sebagai berikut: TiC, TiN, TiB_2, Al_2O_3, SiC, ZrO_2, ZrC, dan SnO_2. Bahan-bahan ini dilekatkan pada permukaan dari berbagai bahan oleh pengendapan uap kimia (CVD), pengendapan uap fisik, dan injeksi lelehan oleh jet plasma.

6.2 Sifat dan penggunaan

Email besi mencakup email baja lunak dan email baja cor. Yang pertama cocok untuk benda berlempeng tipis, seperti wadah untuk makanan, papan pengumuman, papan iklan dan konstruksi, bak mandi, tangki, wadah zat kimia dan wadah-wadah lain yang besar ukurannya, karena dasar dari baja lunak dapat dengan mudah dibentuk menjadi bentuk-bentuk ini. Bahan yang terakhir cocok untuk alat-alat yang tebal dan peralatan seperti perabot gas, bak mandi dan katup-katup yang tahan asam.

Komposisi kimia dari glasur untuk email besi didasarkan pada gelas borosilikat (Tabel 4.29). Glasur harus menutupi logam dasar secara menyeluruh. Koefisien pemuaian termal relatif antara lapisan glasur dan logam dasar sangat penting. Sudah diketahui bahwa lapisan glasur bereaksi dengan oksida dari logam dasar selama pembakaran, dan koefisien pemuaian termal lebih rendah dari logam dasarnya.

Kegunaan dari pelapis keramik adalah: (1) untuk peningkatan ketahanan aus, ketahanan oksidasi dan ketahanan panas dari bahan-bahan dan/atau (2) pembenaran dari fungsi baru terhadap bahan.

Suatu contoh dari perbaikan ketahanan aus adalah pelapisan dari cermet WC–TiC–C oleh TiC, TiN dan Al_2O_3 untuk perkakas mesin. Untuk peningkatan ketahanan oksidasi, Al_2O_3, $MoSi_2$, dan sebagainya, dilapiskan pada baja cetakan temperatur tinggi, dan untuk perbaikan ketahanan panas keramik ZrO_2–Y_2O_3 dilapiskan pada komponen turbin gas. Pelapisan dapat menurunkan temperatur permukaan dari logam dengan jelas akibat hantaran termal dari keramik yang rendah.

Tabel 4.29 Beberapa email frit.

	Email lapisan gerusan putih		Email lapisan gerusan hitam	Enamel for iron sheet				Email tahan panas		Email aluminium
	A	B		Email lapisan penutup	Email dibaurkan antimon	Email putih titania	Email tahan asam	A-19	A-418	
$SiO_2Al_2O_3$	54,3	61,0	49,0	60,9	48,3	49,5	54,6	62,7	29,4	33,1
B_2O_3	14,8	12,4	17,5	9,9	14,1	12,0	12,0	14,1	4,9	5,7
$Li_2O+Na_2O+K_2O$	20,4	18,0	18,1	11,2	13,2	12,5	13,8	15,9	–	24,8
$CaO+ZnO+BaO$	2,5	1,4	2,2	–	2,8	–	9,5	4,5	40,2	–
CaF_2	6,5	6,3	5,4	–	3,3	–	–	–	–	–
$Na_3AlF_6+Na_2SiF_6$	–	–	–	18,0	10,3	6,0	2,5	–	–	–
$CoO+NiO+MnO_2$	1,5	1,0	7,8	–	–	–	–	2,8	1,9	–
TiO_2	–	–	–	–	–	20,6	7,6	–	–	11,5
Sb_2O_5	–	–	–	–	8,0	–	–	–	–	–
PbO	–	–	–	–	–	–	–	–	–	24,9
Cr_2O_3	–	–	–	–	–	–	–	–	23,0	–

*A-19: Untuk baja lunak, A-418: Untuk baja tahan karat

7 REFRAKTORI

7.1 Pendahuluan (Penggolongan)

Refraktori adalah bahan anorganik bukan logam yang sukar leleh pada temperatur tinggi dan digunakan dalam industri temperatur tinggi seperti bahan tungku, dan sebagainya.

Sifat dan penggunaan refraktori mempunyai variasi yang luas dan terlalu banyaknya jenis sangat menyukarkan penggolongan yang sistematis. Refraktori kemudian digolongkan berturut-turut berdasarkan bahan bakunya, mineral penyusun utamanya, sifat kimia, penggunaan dan bentuknya. Yang mempunyai bentuk khas disebut bata tahan api dan lainnya tanpa bentuk khas disebut refraktori bebas. Ini adalah penggolongan refraktori secara morfologi.

Tabel 4.30 menunjukkan penggolongan atas dasar bahan baku dan mineral penyusun utama.

Refraktori bersilika mempunyai kadar SiO_2 94–98% dengan kadar Al_2O_3 dan alkali yang kecil, lebih baik. Sebagai bahan baku digunakan kuarsit alamiah, cert, kuarsa berurat dan sebagainya.

Refraktori lempung dibuat terutama dari kaolinit, pirofilit dan mineral lempung lainnya dari aluminium silikat terhidrasi. Komponen kimia utama adalah SiO_2 dan Al_2O_3. Secara umum kadar Al_2O_3 kurang dari 50%.

Beberapa refraktori alumina tinggi mengandung lebih dari 50% alumina, dan sifat refraktorinya lebih tinggi dari SK 35. Ada bata silimanit yang dibuat dari kianit alamiah ($Al_2O_3 \cdot SiO_2$) dan mulit ($3\ Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)-korundum (Al_2O_3), bata dibuat dengan peleburan listrik. Bata dari komposisi Al_2O_3 yang hampir murni disebut bata alumina dan dibuat secara penyinteran atau secara peleburan listrik.

Refraktori krom mempunyai spinel krom ($FeO \cdot Cr_2O_3$, $MgO \cdot Cr_2O_3$) sebagai mineral penyusun dasar. Ada refraktori krom yang dibuat secara penyinteran dari kromit sebagai bahan baku utama dengan aditif lempung, dan ada yang dibuat secara penyinteran dari kromit dengan klinker magnesia sebagai aditif.

Baik megnesia krom, maupun refraktori magnesia dan krom terdiri dari periklas (MgO), forsterit (Mg_2SiO_4), spinel ($MgO \cdot Al_2O_3$) dan fasa gelas yang mengandung lebih dari 50% magnesia disebut refraktori magnesia-krom dan yang mengandung kurang dari 50% magnesia disebut refaraktori krom-magnesia. Bahan tersebut dibuat dengan penyinteran kromit dan klinker magnesia.

Refraktori magnesia dibuat dari klinker magnesia sebagai bahan baku utama, dan mineral penyusun dasar adalah periklas (MgO). Klinker magnesia yang sangat murni mengandung kira-kira 99% MgO. Bata magnesia yang dibuat dari klinker ini disinter pada temperatur tinggi yaitu setinggi kira-kira 1800°C.

Refraktori karbida silika terutama terdiri dari karbida silikon (SiC), mulit ($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$) dan fasa gelas. Bahan baku utamanya adalah karbida silika, yang dibuat dari batu bersilika (SiO_2) dan kokas yang dipanaskan dalam tungku tahanan listrik pada atau di atas 2200°C.

Tabel 4.30 Hubungan antara karakteristik dan penggunaan dari bata tahan api utama.

Macam	Karakteristik	Penggunaan
Bata silika	1) Murah, masa jenis rendah. 2) Kekuatan mekanik tinggi pada temperatur tinggi. 3) Tidak ada penyusutan setelah penggunaan lama pada temperatur tinggi. 4) Anomali pemuaian pada temp. rendah dan koefisien muai rendah pada temp. rendah dan temp. tinggi. 5) Susah terjadi perontokan struktur. 6) Bersifat asam kuat, tahan terhadap slag asam, dan cukup bagi slag basa.	Langit-langit lengkung dari kiln umum, dinding tanur berbeban tinggi, perapian tungku kokas, bata katup penyalur, dinding dan langit-langit perapian dari tanur perapian terbuka.
Lempung api	1) Murah, mudah dibuat. 2) Daerah mutu yang luas (komponen, sifat-sifat). 3) Pemuaian termal & koefisien konduksi rendah, masa jenis bulk rendah, 4) Tidak terlalu sensitif terhadap semua kondisi (pemanasan/pendinginan cepat, keausan, kerugian fusi), dapat dipakai untuk kondisi biasa. 5) Bersifat asam dan mudah terkorosi oleh slag basa pada temperatur tinggi.	Penggunaan luas. Besi dan baja: Tanur tinggi, tanur tiupan panas, tanur per. terbuka (regenerator), mikser (bag. atas), untuk pembentuk bata api, lubang pembuang, kupola, tungku pemanas, tungku penganil. Lainnya: Bagian yang tidak dipanaskan pada temperatur tinggi seperti cerobong dst, dari berbagai tanur pemurnian logam nonfero, tungku kokas (regenerator), tanur pembuat gas, pencair gelas, kiln kapur, kiln putar semen, kiln tarikan turun, kiln terowongan, ketel uap dan lain sebagainya.
Bata agalmatolit	1) Murah, mudah dibuat. 2) Serupa dengan bata lempung api. 3) Penyusutan permanen rendah, permeabilitas rendah. 4) Stabil terhadap gas CO.	Bata pengalir untuk ladel, kupola dan kiln lain, di tempat yang tidak terpanaskan terlalu tinggi dan yang dipengaruhi aksi kimia kecuali alkali kuat atau oleh abrasi.
Bata alumina tinggi	1) Kerefraktorian tinggi (SK 35–SK 40) 2) Tahan sekali terhadap berbagai slag (secara kimia hampir netral, masih kental pada saat mencair). 3) Kekuatan mekanik tinggi (kekerasan tinggi, tahan aus, terutama dengan bata electrocast).	Bagian tungku pemanas yang terpanaskan tinggi, ketel uap, bagian kiln putar yang terpanaskan lebih tinggi, juga untuk kiln poros, tanur listrik pelebur gelas, dinding dan langit-langit tanur pemurnian logam nonfero.
Bata krom	1) Kerefraktorian tinggi, kekuatan panasnya rendah. 2) Harga menengah, masa jenis tinggi. 3) Secara kimia hampir netral. 4) Getas pada perubahan temperatur mendadak.	Isolasi dari bata bersifat asam dan basa, perapian dari tungku pemanas, tungku pencair timbal, dst. Bagian dari tanur metalurgi, perapian dari tungku pengambilan kembali alkali.
Bata forsterit	1) Bahan dasar lemah secara kimia. 2) Kerefraktorian tinggi, titik lunak tinggi di bawah beban. 3) Dalam perbandingan rendah masa jenis dan konduktivitas termalnya. 4) Mudah rontok kalau kontak dengan oksida besi pada temperatur tinggi.	Bagian yang sangat terpanaskan dari tanur pembakaran kapur, berbagai tungku metalurgi (langit-langit, dst.)

Tabel 4.30 Lanjutan

Macam	Karakteristik	Penggunaan
Magnesit krom	1) Kerefraktorian tinggi, titik lunak tinggi pada beban, tetapi kekuatan mekanik kurang pada temperatur tinggi. 2) Tahan terhadap slag basa. Pada 1600°C atau di atasnya mengabsorpsi oksida besi dan terjadi ledakan. 3) Lebih tahan terhadap perubahan temperatur mendadak dari pada bata krom dan magnesia, tetapi menjadi getas setelah perubahan berulang. Berbahaya di bawah 1600°C pada saat digunakan pada temperatur tinggi. 4) Koefisien muai besar, demikian juga konduktivitas termal dan massa jenisnya. 5) Secara relatif mahal.	Tanur pembuatan baja basa (langit-langit, dinding, saluran udara masuk, ruang slag, perapian). Bagian pembakaran pada kiln putar semen-dolomit. Dasar lubang buangan, dinding dan perapian dari tungku pemanas, tanur pemurnian dan tanur lebur untuk Al, Cu dan logam nonfero lainnya. Perapian untuk tanur pengambilan kembali alkali.
Bata magnesia	1) (Sama dengan di atas). 2) Basa kuat, sangat tahan terhadap slag basa. 3) Lunak terhadap perubahan mendadak dari temperatur dan uap. 4) Massa jenis tinggi, mahal kalau diperbandingkan.	Tanur perapian terbuka basa (dasar perapian), mikser (bagian bawah), tanur listrik (dinding), tanur untuk Cu, Ni, dan logam nonfero lainnya.
Bata dolomit	1) Kerefraktorian tinggi. 2) Tahan terhadap slag basa. 3) Terdapat banyak kelas (metastabil, stabil, magnesit, dan sebagainya).	Pelapis dari tanur pembuat baja basa (konvertor, anur listrik, tanur perapian terbuka). Tanur untuk industri kimia.
Karbida silikon	1) Kerefraktorian luar biasa tingginya, kekuatan panas dan ketahanan aus. 2) Mudah dioksidasi pada atau sekitar 1000°C. 3) Asam lemah secara kimia, kuat terhadap slag asam tetapi dioksidasi oleh oksida logam berat pada atau di atas 1200°C. 4) Kurang permeabel terhadap slag, sukar terjadi kerontokan secara struktur. 5) Konduktivitas termal cukup tinggi, koefisien muai termal rendah, jadi dapat tahan terhadap perubahan temperatur yang mendadak. 6) Mahal secara menyolok.	Mufel, retort, tegel rekuperator, tanur pemanggang untuk keramik, tanur destilasi seng vertikal, tanur konversi kalium, ketel uap (jalur klinker tegel pembakar), ladel untuk baja khusus, pelapis kiln kimia.
Bata karbon	1) Kerefraktorian luar biasa tingginya dan titik lunak tinggi pada beban. 2) Netral secara kimia, ketahanan korosi tinggi. 3) Konduktivitas termal dan listrik tinggi, kuat terhadap kejutan termal. 4) Mudah dioksidasi pada temperatur tinggi.	Tanur tinggi (perapian, dinding), tanur listrik untuk paduan fero (perapian), tangki elektrolisis untuk logam ringan, penyumbat untuk pembuatan baja (bata lempung grafit).

7.2 Sifat dan penggunaan

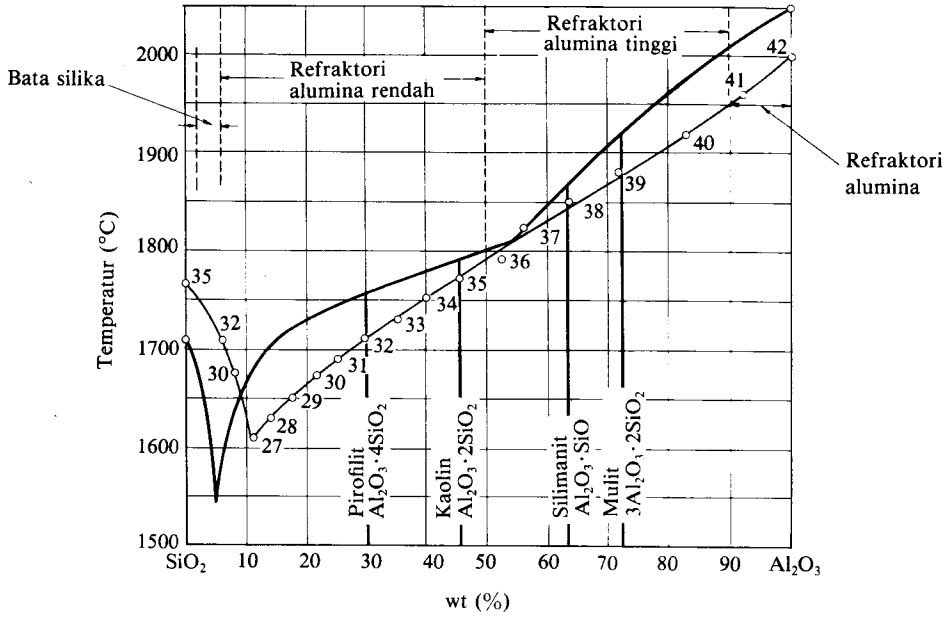
7.2.1 Sifat kimia dari refraktori dan penggunaannya

Hubungan yang erat terdapat antara komponen kimia refraktori dan berbagai sifat penting selama penggunaan praktis. Hubungan yang ditunjukkan pada Gb. 4.47 terdapat antara sifat refraktori dan komposisi kimia refraktori SiO_2–Al_2O_3. Dari gambar terlihat bahwa sifat refraktori dari refraktori SiO_2–Al_2O_3 berubah dengan perbandingan SiO_2/Al_2O_3 dan nilainya hampir sesuai dengan temperatur fasa cair dari sistem biner SiO_2–Al_2O_3. Selanjutnya, komposisi pada kira-kira 5% Al_2O_3 adalah titik entektik dalam diagram kesetimbangan dari sistem SiO_2–Al_2O_3, dan sistem ini mempunyai temperatur fasa cair terendah. Andaikan suatu tungku disusun sehingga refraktori silika dan alumina saling berhubungan langsung, maka akan bereaksi pada titik pertemuan meskipun pada temperatur yang diharapkan masih dapat diterima untuk sifat refraktorinya. Jadi kerusakan dari tungku dapat terjadi pada temperatur yang lebih rendah dari yang diharapkan. Hal ini mudah dilihat dari diagram kesetimbangan sistem SiO_2–Al_2O_3.

Seperti dinyatakan semula, pengetahuan mengenai komposisi kimia dari refraktori tidak hanya diperlukan untuk estimasi sifat refraktori, tetapi juga membantu penggunaan diagram kesetimbangan untuk meramalkan kerusakan yang mungkin disebabkan oleh reaksi kimia antara refraktori dan bahan yang berhubungan dengannya pada temperatur tinggi.

Bila mineral konstituen utama dari refraktori bersifat asam netral dan oksida basa bahan itu berturut-turut disebut: refraktori asam, refraktori netral dan refraktori basa.

Refraktori bersilika dan alumina adalah refraktori asam dan refraktori magnesia



Gb. 4.47 Perbandingan kurva titik cair dan kurva ke-refraktori-an dalam sistim SiO_2-Al_2O_3

dan dolomit adalah refraktori basa yang khas. Refraktori krom adalah netral. Dengan menggolongkan refraktori secara kasar seperti dinyatakan di atas berdasarkan sifat kimianya, perkiraan kecenderungan reaksi dengan refraktori adalah mungkin, karena sifat kimia bahan yang berhubungan langsung dengan refraktori pada temperatur tinggi. Misalnya, untuk pelapis kiln penyinter klinker semen, dipakai refraktori spinel yang netral atau refraktori basa. Klinker semen adalah basa dan bereaksi bebas dengan refraktori asam pada temperatur tinggi.

8 ISOLATOR TERMAL

8.1 Pendahuluan

Bahan isolasi anorganik dari mineral alam telah lama dipergunakan. Pada masa sekarang permintaan akan bahan ini sangat meningkat dimulai dari penghematan sumber dan energi mengarah kepada perbaikan sifat dan pengembangan bahan baru.

Bahan isolasi termal dari kebanyakan bahan anorganik dapat digolongkan menurut bentuk menjadi jenis bubuk-butiran, jenis serat dan bungkahan. Bahan dalam bentuk bubuk atau butiran adalah bahan otoklaf dari kalsium silikat, perlit, vermikulit, silika gel butir halus, dan bahan yang berbentuk serat adalah asbes, wol batu, wol slag dan serat keramik. Kebanyakan dari bata api isolasi berbentuk bungkah, tetapi sekarang tumbuh pesat sekali pembuatan refraktori yang dapat dicorkan. Bahan isolasi jenis bubuk dan butiran sering dipergunakan setelah dibuat bentuk pelat atau bentuk bata.

Salah satu sifat dasar yang diperlukan bagi bahan isolasi adalah hantaran termal yang rendah. Umumnya konduktivitas termal dari bahan keramik lebih rendah dari pada bahan logam. Gas memiliki konduktivitas termal yang lebih rendah daripada bahan padat, dan bahan yang mengandung banyak udara memberikan struktur yang menahan perpindahan panas dengan konveksi oleh udara sehingga memiliki isolasi termal yang baik sekali.

8.2 Sifat dan penggunaan

Temperatur untuk bahan isolasi termal berkisar antara −250°C sampai 1500°C. Perlu memilih bahan yang paling cocok untuk keperluan pada masing-masing penggunaan.

8.2.1 Bahan isolasi termal bentuk serat

Asbes adalah bahan mineral yang berupa serat terbentuk secara alamiah, ditemukan di alam sebagai krisotil, amosit, krosidolit, dst. Asbes dapat dipakai sebagai bahan isolasi setelah mineral tersebut dilepaskan menjadi bentuk seperti kapas. Sekarang telah tersedia isolator dalam bentuk kain asbes, tali asbes dan spon asbes. Spon asbes akhir-akhir ini dikembangkan sebagai bahan isolasi termal yang mempunyai sifat fleksibel dan tahan panas yang baik sekali.

Wol slag dan wol batu berturut-turut dibuat dari slag tanur tinggi dan dari batuan gunung berapi. Bahan baku dicairkan dalam kupola atau tanur listrik dan dibuat menjadi serat halus. Permukaannya dilapisi resin agar tahan terhadap air. Bahan ini dipergunakan terutama sebagai isolasi pada pekerjaan konstruksi.

Serat keramik termasuk wol gelas kuarsa, serat Al_2O_3–SiO_2 dan serat alumina. Serat keramik ini memiliki sifat khas sebagai berikut:

1) Tahan terhadap temperatur tinggi
2) Ringan dan sangat baik sebagai isolator
3) Tahan terhadap kejutan termal
4) Secara kimia, stabil dan
5) Dapat dibuat menjadi berbagai bentuk.

Bahan ini dibuat menjadi bentuk seperti kapas, felt dan lembaran tipis dan dipakai sebagai bahan isolasi yang baik sekali untuk lapisan dinding tanur, untuk tanur temperatur tinggi, dst. Bahan ini dipergunakan juga sebagai bahan isolasi untuk ketel uap, turbin dan gas buang, peralatan permurnian, dst. (Gb. 4.48), karena bahan ini stabil secara kimia dan sukar patah oleh getaran.

Gb. 4.48 Produk dibuat dari serat keramik.

8.2.2 Bahan isolasi dalam bentuk bubuk dan bentuk bata

Bahan otoklaf kalsium silikat secara kasar dapat digolongkan kepada bahan yang terutama terdiri dari tobermorit $Ca_5(Si_6O_{18}H_2)\cdot 8H_2O$ dan yang terutama terdiri dari ksonotlit $Ca_6Si_6O_{17}(OH)_2$. Kedua bahan tersebut hampir memiliki sifat yang sama dalam hantaran termal, tetapi bahan isolasi termal dari ksonotlit lebih unggul daripada bahan isolasi yang terbuat dari tobermorit karena tahan terhadap gas karbon dioksida, dan memiliki penyusutan rendah pada temperatur tinggi. Bahan tersebut dipergunakan sebagai bahan isolasi tahan api pada bangunan bertingkat banyak, bahan isolasi perumahan, bahan penyekat antara bagian panas dan bagian dingin, dan sebagainya.

Kalau ukuran porus dibuat lebih kecil dari lintasan bebas rata-rata dari gas yang terperangkap dalam porus, maka penembusan gas sangat terhalang, hal ini menurunkan perpindahan panas oleh pergerakan gas. Berdasarkan azas ini, maka dibuat bahan isolasi termal dari butiran halus silika gel, karbon hitam dan oksida titanium. Bahan isolasi untuk tanur adalah bahan isolasi termal yang sejak lama telah dipergunakan yang memiliki sifat refraktori baik sekali. Bahan ini harus memiliki sifat: (1) ringan, (2) refraktori yang baik sekali, dan (3) baik sebagai isolasi termal.

Bata tahan api alumina sebagai isolasi untuk temperatur tinggi terdiri dari 90–

99% Al_2O_3, yang memiliki sifat khas: (1) tahan korosi terhadap slag asam dan basa, (2) tahan terhadap gas pereduksi seperti gas H_2, (3) tahan rontok (spalling) yang sangat baik. Bahan ini dipakai untuk lapisan tanur penganil baja tahan karat, tungku penyolder, tungku perlakuan panas untuk semikonduktor dan tungku bergas hidrogen.

Bata tahan api isolasi termal terbuat dari bahan bersifat silikat memiliki sifat khas (1) temperatur pelunakan beban tinggi (2) stabil secara termal pada temperatur tinggi dan (3) tidak bereaksi dengan bata silika pada temperatur tinggi. Bata ini dipergunakan sebagai lapisan refraktori silikat dalam tanur tinggi, lapisan penahan pada tanur pelebur gelas dsb.

9 BAHAN ABRASIF

9.1 Pendahuluan

Bahan anorganik keras yang dipergunakan sebagai bahan pemotong dan pemoles: logam, kayu, plastik keramik dsb, dinamakan bahan abrasif. Bahan ini dipergunakan dalam bentuk butir atau bubuk, dan dibuat dalam bentuk perkakas seperti batu gerinda kain dan kertas ampelas. Berbagai macam proses pemesinan mempergunakan bahan abrasif. Pengelapan (laping) mempergunakan bahan abrasif dicampur pelumas, penggosokan mempergunakan kompon abrasif dicampur minyak atau fet, dalam pemolesan laras bahan pemoles dimasukkan ke dalam laras dan digosokkan dengan gerakan memutar, dalam proses injeksi bahan abrasif disemprotkan, dan dalam proses ultrasonik bahan abrasif membentur bahan. Sebagai perkakas bahan abrasif dibuat batu gerinda, batu hon, batu superfinis, kain ampelas dan kertas ampelas.

9.2 Sifat dan penggunaan

9.2.1 Abrasif

Dapat diperoleh abrasif buatan dan abrasif alam, seperti ditunjukkan dalam Tabel 4.31 yang dibagi menjadi penggerindaan dan pengelapan. Dalam tabel, ampelas berarti kristal korundum di mana magnetit halus didispersikan. Nitrida boron adalah fasa tekanan tinggi dan dibuat seperti intan di bawah temperatur dan tekanan tinggi. Abrasif yang paling banyak dipergunakan untuk berbagai maksud pada saat ini, adalah alumina dan karbida silikon. Intan, nitrida boron dan karbida boron dipakai untuk pemolesan bahan sangat keras. Garnet dipergunakan untuk pemolesan gelas dan untuk kertas ampelas kayu.

Bahan abrasif dihancurkan dan diayak dengan berbagai cara. Bubuk halus dipisah-pisahkan menjadi ukuran-ukuran butir tertentu.

Sifat khas yang penting dari bahan abrasif adalah sifat bahan mineral dan

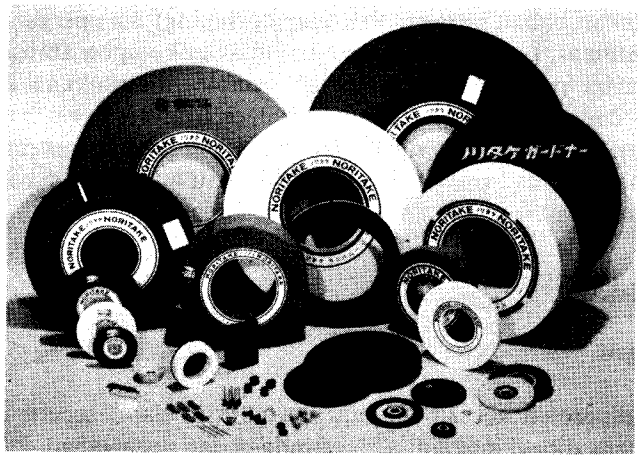
Tabel 4.31 Klasifikasi dari abrasif.

Abrasif alam	Terutama untuk gerinda	Intan, korundum, emeri, garnet, batu bersifat silika (flint), dst.
	Terutama untuk pemolesan	Tripolit, tanah diatom, bubuk batu pumis, dolomit (sinteran), dst.
Abrasif buatan	Terutama untuk gerinda (Abrasif buatan)	Intan buatan, nitrida boron, karbida boron, karbida silikon, alumina leburan, emeri buatan, zirkonia leburan, dst.
	Terutama untuk pemolesan	Alumina, oksida besi, oksida kromium, oksida serium, dst.

strukturnya, komposisi kimia ukuran butir, bentuk partikel, masa jenis butir, kekerasan, keuletan dan ketahanan aus.

9.2.2 Batu gerinda

Batu gerinda yang sekarang dipakai di industri adalah batu gerinda buatan di mana butir bahan abrasif diikat satu sama lain oleh berbagai bahan pengikat (Gb. 4.49). Pengikat utama adalah gelas atau porselen yang dibuat dengan pengadukan dan menyinteran dengan felspar, lempung pasir silika dan juga dipakai berbagai resin seperti resin fenol. Batu gerinda yang mempergunakan pengikat yang disebut pertama dinamakan batu gerinda gelasan dan yang diikat oleh resin dinamakan batu gerinda resinan. Di samping itu dipergunakan juga beberapa pengikat seperti karet alam atau karet buatan dengan sejumlah besar belerang, natrium silikat dicampur dengan oksida seng dan resin selak alam.



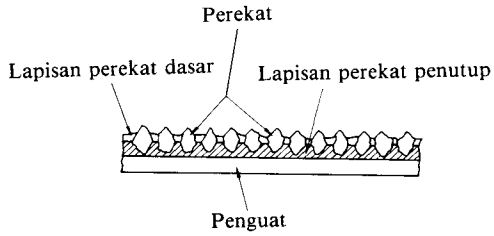
Gb. 4.49 Batu gerinda.

Pada pemakaian batu gerinda, butiran pemotong terikat di tempat oleh bahan pengikat sampai satu saat jatuh dan diganti oleh butiran baru di bawhnya. Selanjutnya, rongga pori memegang peran penting sebagai tempat untuk bahan yang jatuh tergores atau memberikan sudut garuk pada penggerindaan, dan meradiasikan panas yang terjadi, dst. Jadi butir. pengikat dan pori adalah tiga faktor utama yang penting pada batu gerinda. Batu gerinda gelasan atau yang divitrivikasikan sangat banyak dipakai karena ketiga faktor tersebut sangat mudah dikendalikan dan ketahanan panasnya sangat baik, pemakaiannya terutama sangat menonjol pada penggerindaan presisi. Di lain fihak gerinda resinan dapat dipakai pada putaran tinggi karena kekuatan tariknya yang tinggi, dengan memanfaatkan sifat khasnya batu gerinda ini dipakai untuk pengerjaan penyelesaian yang sederhana dan untuk membuang sirip pada coran.

Tiga jenis batu gerinda intan dapat diperoleh, yaitu yang diikat logam, diikat resin dan yang diikat oleh lempung grafit. Batu gerinda yang diikat oleh logam ada dua jenis, yaitu yang diikat oleh paduan tembaga dan yang diikat oleh WC sebagai pengikat dasar dan paduan Cu-Ni sebagai pengikat kedua. Yang kedua adalah batu gerinda keras dipakai untuk memotong beton.

9.2.3 Ampelas

Kain ampelas dan kertas ampelas terdiri dari bahan dasar, abrasif dan perekat, susunan umumnya ditunjukkan dalam Gb. 4.50. Ampelas dibuat dalam bentuk lembaran, gulungan, pita ban, piringan dst (Gb. 4.51). Ada berbagai variasi yang dapat diperoleh yang ditentukan oleh kombinasi abrasif dalam: jenis, ukuran butir, lapisan dan kerapatan lapisan, jenis bahan dasar (kain atau kertas), perekat biasa atau resin fenol, dst. Di samping itu ada jenis basah dan jenis kering. Untuk jenis basah, bahan dasar diolah terlebih dahulu agar air dengan mempergunakan resin cair, dst, dan perekatnya diambil dari jenis yang tahan air.



Gb. 4.50 Gambar skema dari struktur kain/kertas ampelas.

Gb. 4.51 Kain dan kertas ampelas (The Ceramic Society of Japan: Ceramic Engineering Handbook, Gihodo).

10 | KERAMIK KHUSUS

10.1 Keramik elektronik

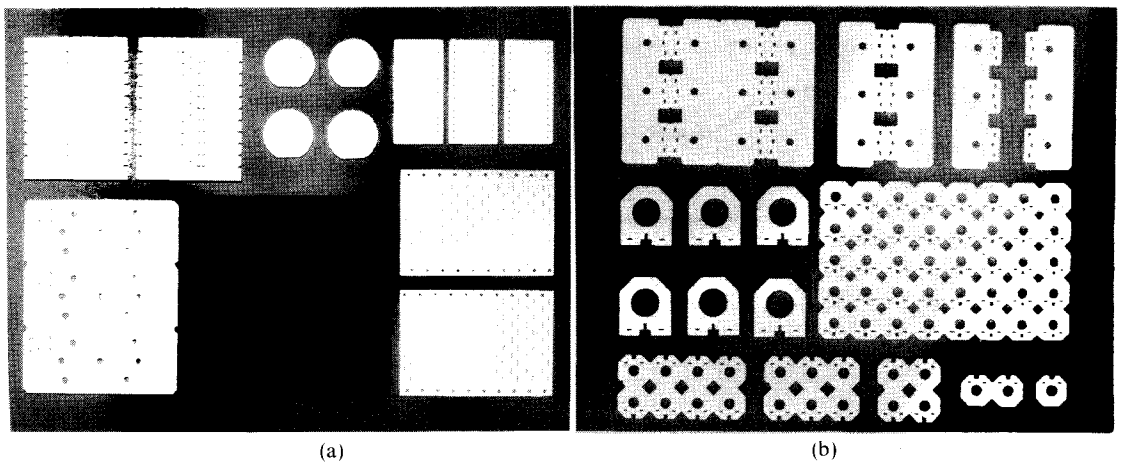
10.1.1 Bahan isolasi

Isolator, soket, tombol kontak adalah jenis keramik isolasi yang mempunyai sejarah paling tua. Kebanyakan dibuat dari barang tanah dan porselen seperti telah dijelaskan pada Bab 3, dan sekarang juga masih dipakai secara luas sebagai isolator frekuensi rendah. Sedangkan isolator yang memerlukan ketahanan yang baik terhadap kejutan termal seperti pada pelindung busur listrik dan inti pembatas arus dipakai keramik kordierit.

Bahan keramik peralatan putih di atas tidak dapat dipakai sebagai isolator dalam daerah frekuensi tinggi karena kerugian daya listriknya besar. Dalam pada itu berbagai bahan isolasi telah dikembangkan untuk memenuhi berbagai persyaratan sesuai dengan perkembangan dalam bidang elektronik (Gb. 4.52). Penggunaannya bervariasi luas dan yang utama adalah: Busi, kotak alas IC, alas semikonduktor, alas tahanan, berbagai alas komponen rangkaian, bola lampu natrium tekanan tinggi (alumina baur cahaya). Sifat khas yang diinginkan sedikit berubah menurut penggunaan, tetapi pada umumnya adalah sebagai berikut:

1) Tan δ yang menyebabkan kerugian listrik harus kecil
2) Kekuatan mekanik yang tinggi
3) Tahan panas
4) Tidak ada perubahan terhadap waktu, dan
5) Tegangan/voltase putusnya tinggi.

Sebagai tambahan terhadap sifat di atas, untuk beberapa jenis pemakaian



(a) (b)

Gb. 4.52 Isolator.

Tabel 4.32 Berbagai sifat utama bahan isolasi.

Bahan	Karakteristik		Masa jenis (g/cm^3)	Sifat listrik				Sifat fisik		
				Medan hancur (kV/mm)	Tahanan ($\Omega \cdot cm$) 20°C	300°C	ε_s 1 MHz	tan δ $\times 10^{-4}$ 1 MHz	Kekuatan lentur (kg/cm^2)	Konduktivitas termal ($cal/cm \cdot sec°C$)	Koefisien pemuaian panjang $\times 10^{-6}$ ($1/°C$)
Alumina (Al_2O_3)											
92%	Mekanik	kuat	3,6	10	$>10^{14}$	10^{13}	8,5	3	3200	0,04	6,5
96%	Kimia	stabil	3,8	10	$>10^{14}$	10^{14}	9,4	2	2800	0,05	6,7
99,5%	Tahanan panas	baik	3,8	10	$>10^{14}$	10^{14}	9,7	2	2800	0,06	6,8
Forsterit	Kehalusan permukaan	baik	2,8	10	$>10^{14}$	10^{13}	6,5	3	1500	0,008	10,2
($2MgO \cdot SiO_2$)	Kejutan termal	lemah	3,0	10	$>10^{14}$	10^{13}	8,0	2	1450	0,008	8,8
Steatit	Murah		2,7	9	$>10^{14}$	10^{11}	6,3	6	1650	0,006	7,2
($MgO \cdot SiO_2$)	Tahanan panas	buruk	3,1	8	$>10^{14}$	10^{8}	6,4	-	1600	0,009	8,1
Zirkon	Kehalusan permukaan	baik	3,4	-	$>10^{14}$	10^{8}	-	-	1700	0,012	4,3
($ZrO_2 \cdot SiO_2$)	Kejutan termal	kuat	3,5	10	$>10^{14}$	10^{11}	-	-	1700	0,012	3,9
Magnesia	Konduktivitas termal	tinggi	3,4	10	$>10^{14}$	$>10^{14}$	8,0	1	2000	0,1	11,0
(MgO)	Pemuaian termal	besar									
Berilia	Konduktivitas termal	tinggi	2,9	10	$>10^{24}$	10^{13}	6,0	1	1000	0,5	8,0
(BeO)	Pemuaian termal	besar									
Porselen mulit	Murah Pembuatan masih mungkin		~2,4	~6	$\sim 10^{11}$	$\sim 10^{7}$	~6	~90	~800	~0,003	~4

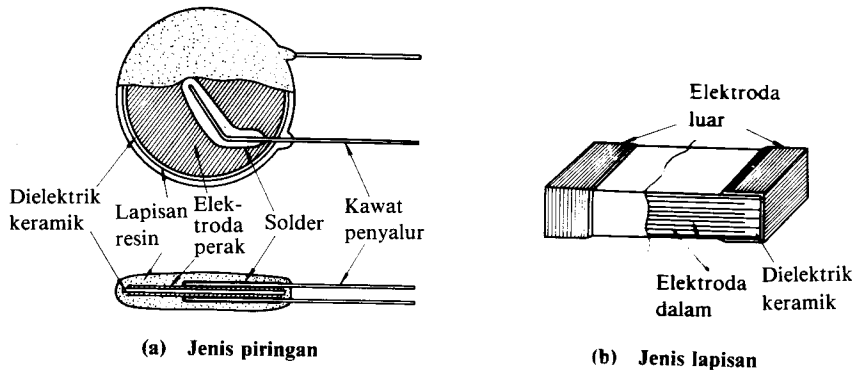
diperlukan sifat berikut:

1) Konstanta dielektrik yang kecil (untuk memperkecil berkurangnya propagasi sinyal.
2) Konduktivitas termal yang tinggi (untuk memperbaiki radiasi termal dalam isolator daya tinggi)
3) Koefisien pemuaiannya kira-kira sama dengan Si (kalau menempel pada Si)
4) Dapat dilogamkan dengan baik (Ini penting untuk penyesuaian dan pemisahan kabel penyalur).

Alumina merupakan bahan isolasi yang sangat baik yang dapat memenuhi hampir semua persyaratan yang diminta di atas. Tabel 4.32 menunjukkan sifat-sifat isolator utama.

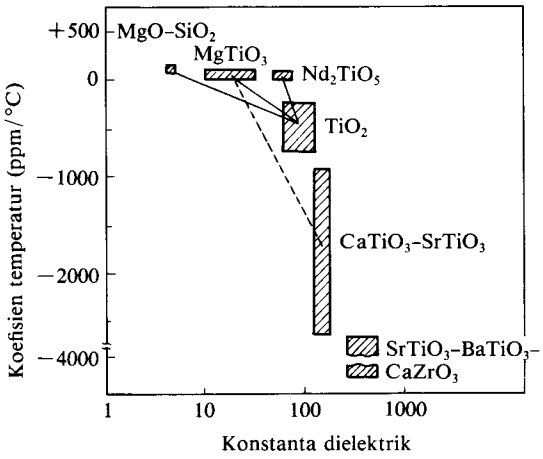
10.1.2 Bahan dielektrik

Penggunaan yang paling penting dari dielktrik keramik adalah untuk kapasitor. Kapasitor keramik secara garis besar diklasifikasikan menurut bentuk yaitu yang berbentuk piringan atau pelat dielektrik satu lapis dan yang lapisannya banyak disebut



(a) Jenis piringan (b) Jenis lapisan

Gb. 4.53 Struktur kapasitor keramik.



Gb. 4.54 Hubungan antara konstanta dielektrik dengan koefisien temperatur dari dielektrik temperatur terkompensasi.

jenis laminasi (Gb. 4.53). Selain itu diklasifikasikan juga oleh sifat khas dielektrik yaitu untuk kompensasi temperatur dan untuk konstanta dielektrik yang tinggi.

Kapasitor kompensasi temperatur dipakai untuk kompensasi perubahan temperatur dari komponen elektronik seperti lilitan, tahanan dan osilator kristal. Gb. 4.54 menunjukkan hubungan antara konstanta dielektrik dari bahan utama dan koefisien temperatur yang merupakan ukuran dalam perubahan konstanta dielektrik terhadap temperatur.

10.1.3 Bahan piezoelektrik

$BaTiO_3$ adalah bahan keramik pertama yang dipergunakan sebagai piezoelektrik. Kemudian ditemukan bahwa larutan padat $PbTrO_3$–$PbTiO_3$ (PZT) mempunyai sifat piezoelektrik lebih unggul, dan dengan demikian memperluas penggunaan keramik piezoelektrik secara lebih berarti. Dengan menambah komponen ketiga Pb $(Mg_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, $Pb(Y_{1/3}Nb_{2/3})O_3$, dst kepada PZT maka daerah pemilihan lebih diperluas dalam: titik curie, konstanta dielektrik, koefisien kopeling elektromekanik, koefisien kualitas mekanik dan konstanta lainnya. Tabel 4.33 menunjukkan daftar pengunaan piezokeramik.

10.1.4 Bahan semikonduktor

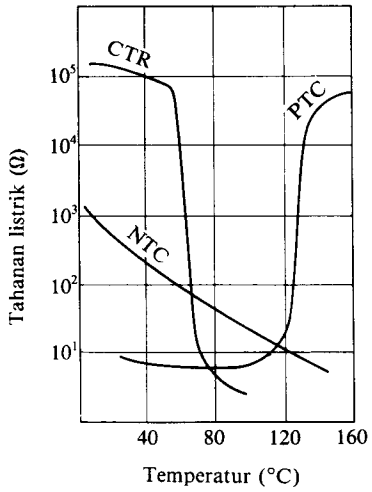
Dalam bahan keramik semikonduktor, termistor, varistor dan sensor digunakan secara praktis.

Termistor, resistor yang peka sepenuhnya secara termal, secara harfiah berarti semikonduktor keramik dengan variasi termal yang tinggi. Ada termistor dengan koefisien temperatur negatif (NTC), dalam mana tahanan berkurang dengan bertambahnya temperatur, termistor dengan koefisien temperatur positif (PTC), yang tahanannya bertambah menurut temperatur dan resistor temperatur kritik (CTR) yang tahanannya berubah tajam pada temperatur kritik (Gb. 4.55).

NTC dibuat dengan mancampurkan berbagai oksida logam, dari logam Mn, Co, Ni, Cu, Fe, dan sebagainya, dan disinter dalam atmosfir pengoksid. PTC yang khas adalah keramik $BaTiO_3$, yang dibuat menjadi semikonduktor oleh penambahan

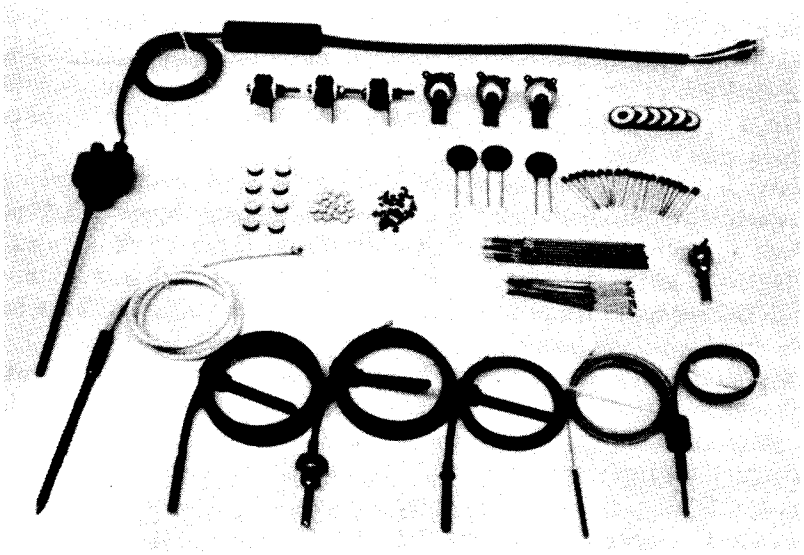
Tabel 4.33 Bidang penggunaan keramik piezoelektrik.

Penggunaan sebagai osilator	Contoh
Osilator piezoelektrik	Osilator, resonator, saringan
Osilator komposit	Garpu putar piezoelektrik, saringan garpu putar, kopeling piezoelektrik
Saringan mekanik	Saringan mekanik
Transformer piezoelektrik	Transformer boost untuk sumber tenaga tegangan tinggi TV
Unit delay	Unit delay untuk TV, peralatan komunikasi dan komputer
Penggunaan sebagai transformer	**Contoh**
Pengukuran	Manometer, vibrometer, meter percepatan
Pengukur gelombang supersonik	Meter aliran, tachometer, anemometer, indikator kecepatan suara, level gage, pengukur kepadatan lalu lintas
Transformer akustik:	
di udara	Pickup, mikropon, penerima, corong suara, TV kendalian jauh, dst.
di bawah air	Pengukur dalam supersonik, pencari ikan, soner, mikropon, corong suara.
di benda padat	Pengukur cacat supersonik, meter tebal, detektor cacat pada beton, probe bawah tanah.
Transformer akustik fisik	Berbagai transformer untuk penelitian fisik, efek Schlieren, kisi difraksi supersonik, dst.
Transformer supersonik daya tinggi	Proses pembersihan, ventilasi, pengaduk pengemulsian pencampuran, pemercepat reaksi, dst.
Transformer supersonik medis	Diagnosa dari kelainan pada otak dan jantung, perlakuan tumor otak, dst.
Lainnya	Penyalaan bunga listrik piezoelektrik (penyulut gas), pompa piezoelektrik, dst.



Gb. 4.55 Hubungan antara temperatur dengan tahanan listrik dalam termistor.

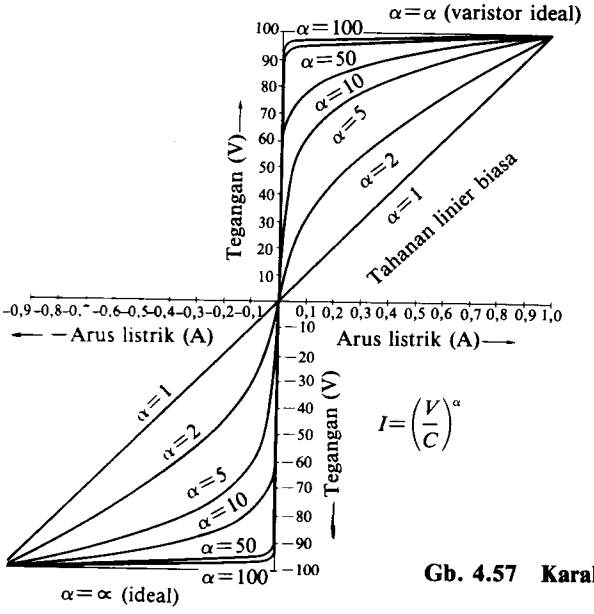
sedikit Y_2O_3. Komponen utama dari CTR adalah VO_2, yang ditambah oksida Sr, P atau B dan disinter dalam atmosfir yang mereduksi dan dicelup dingin. Kebanyakan termistor dibuat dalam bentuk butiran, piringan, cincin dan batang (Gb. 4.56). Butiran dipergunakan untuk pengukuran dan pengendalian temperatur secara teliti sekali. Piringan dipakai untuk kompensasi temperatur bagi transistor dan lilitan pembelok pesawat TV. Cincin dipakai untuk pengendalian arus pada penyalaan lampu,



Gb. 4.56 Termistor (Dipotret oleh Y. Kato).

sedangkan CTR dipergunakan untuk sensor panas yang sangat dapat diandalkan. PTC dalam bentuk sarang tawon memiliki fungsi pengendalian sendiri dari temperatur dan didistribusikan sebagai pemanas yang aman.

Varistor dipakai untuk tahanan variabel, merupakan istilah umum bagi bahan yang memiliki perubahan tahanan yang sangat karena adanya tegangan listrik. Salah satu bahan ini adalah SiC dan ZnO. Hubungan antara arus (A) dan tegangan (V) dari varistor dinyatakan dalam persamaan $A=(V/C)^{\alpha}$, di mana α diinginkan sebesar mungkin (Gb. 4.57) dan C adalah konstanta.



Gb. 4.57 Karakteristik tegangan-arus dari varistor.

Varistor SiC dibuat dari bubuk SiC dengan menambahkan lempung atau pengikat lainnya diaduk dan disinter dalam atmosfir pengoksid. Harga α pada umumnya 3,3–5. Varistor ZnO dibuat dari ZnO dibubukkan secara halus dan ditambahkan kepadanya sedikit Bi_2O_3 atau CoO, MnO, Sb_2O_3 dan kemudian disinter. Harga α umumnya sekitar 30–50.

Varistor menyerap tegangan tandingan yang terjadi pada saat pemutusan arus pada beban. Contoh khas adalah peniadaan loncatan api listrik terjadi pada kontak reli. Juga dipergunakan secara luas untuk menahan suara brisik pada motor ukuran kecil, tegangan lebih, pelindung pada berbagai rangkaian listrik dan komponen, dst. Varistor SiC memiliki harga α yang kecil, tetapi mempunyai ciri khas bahwa dapat dipakai untuk keadaan beban tetap dan untuk daya yang besar.

Di samping termistor tersebut di atas, berbagai sensor semikonduktor sedang dikembangkan. Sensor untuk menditeksi gas propan atau gas kota adalah bahan porus yang terutama terdiri dari SnO_2, ZnO atau Fe_2O_3. Perubahan tahanan dari semikonduktor karena adanya kontak dengan gas dimanfaatkan untuk mengetahui adanya gas. Sensor lembaban dipergunakan untuk pengendalian alat penyegar udara dan tungku elektronik. Bahan sensor lembaban adalah $MgCr_2O_4$–TiO_2, TiO_2–V_2O_5 dan keramik porus lainnya, dipergunakan dengan memanfaatkan sifat penurunan tahanan dengan bertambahnya lembaban.

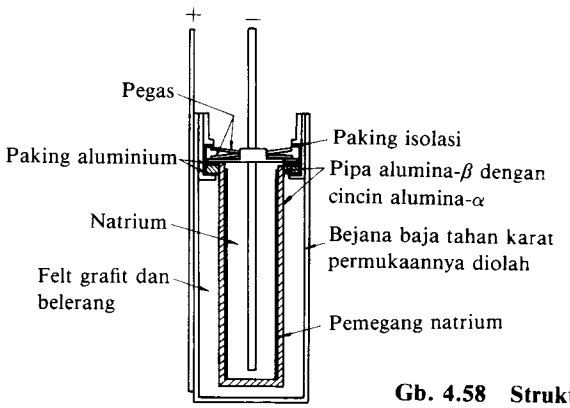
10.1.5 Jenis bahan semikonduktor

(1) Semikonduktor ion

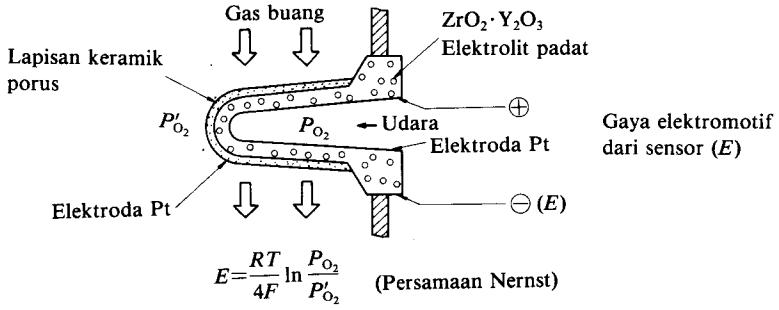
Seperti telah ditunjukkan terdahulu dalam Tabel 4.10 berbagai semikonduktor ion telah dikenal dan penelitian serta pengembangan untuk bahan yang lebih unggul masih berlanjut. Kebanyakan penggunaan semikonduktor ion tersebut masih sedang dipelajari. Sebagai contoh, keramik alumina β dicatat sebagai elektriolit untuk diafragma pada batere Na/S (Gb. 4.58). Di antara konduktor ion, ZrO_2 yang distabilkan banyak dipergunakan karena keunggulannya dalam konduktivitas ion oksigen sebagai detektor kadar oksigen dalam besi cair, dalam gas buang kendaraan dan berbagai gas yang sedang dibakar (Gb. 4.59).

(2) Gelas konduktor

Gelas yang permukaannya dilapisi film SnO_2 atau In_2O_3 dengan berbagai cara, bersifat tembus cahaya dan dapat mengalirkan listrik. Sifat ini dipergunakan untuk elektroda pada panel petunjuk kristal cair.



Gb. 4.58 Struktur batere Na/S.



Gb. 4.59 Struktur dasar dari sensor oksigen untuk gas buang mobil.

(3) Elemen pemanas

Karbon dipergunakan sejak lama sebagai elemen pemanas, tetapi tidak dapat dipakai di dalam udara seperti halnya tungsten, molibden dan elemen pemanas lainnya dari logam tahan temperatur tinggi. Tabel 4.34 menunjukkan elemen pemanas yang dapat dipakai di dalam udara pada temperatur tinggi.

10.2 Keramik magnet

Seperti talah dikemukakan dalam 2.3 Bagian IV, bahan magnet yang berupa oksida yang disebut ferit banyak sekali dipergunakan. Tabel 4.35 menunjukkan penggunaannya. Ferit digolongkan menjadi bahan magnet lemah yang arah pemagnetannya dapat dibalik oleh medan magnet lemah, dan bahan magnet keras yang sekali dimagnetkan dapat menahan sifat magnetnya meskipun medan magnet luar ditiadakan sehingga merupakan magnet permanen. Golongan pertama terutama dari ferit spinel dan yang kedua hampir semua ferit magnetoplumbit.

Tabel 4.34 Sifat nonlogam elemen pemanas.

Bahan	Nama dagangan dan kelas	Temperatur pakai tertinggi (°C)	Tahanan (Ω·cm)	Titik cair (°C)	Koefisien pemuaian panjang	Panas jenis	Berat jenis	Kekuatan lentur (kg/cm²)	Sifat lain
		Dalam tungku			(20–1000°C)				Porositas
Karbida silikon (>99% SiC)	Elemer: D_3	1600	0,10 (1000°C)	>2400	$4,5\times10^{-6}$	0,18	3,2	600	22%
	Elemer: SG	1650	0,016 (1000°C)	>2400	$4,5\times10^{-6}$	0,18	3,2	1500	5%
	Silit-ED	1600	0,08 (1000°C)	>2400	$5,6\times10^{-6}$		3,2	700–1000	28%
	Hot Rod	1600	0,07 (1000°C)	>2400				470	26%
		Pada permukaan elemen							Temperatur tetap
Silisida molibden ($MoSi_2$)	Cantal super 33	1800	$0,3\times10^{-4}$ (20°C)	2030				3600±30%	0,0048
	Cantal super ST	1700		2030	$7\text{–}8\times10^{-6}$	0,2	5,6	3300±10%	0,0042
	Mosilit	1700	$0,29\times10^{-4}$ (20°C)	2030 (2000)	$7,5\times10^{-6}$		5,5	3300±10%	
Zirkonia (ZrO_2)	ZAT	2000	0,08 (2000°C)	2680					Tidak diproduksi lagi
Lantan kromat ($LaCrO_3$)	Keramax	1800	0,11 (1500°C)	2490	$9,7\times10^{-6}$	0,11	6,5	500	Porositas 21%

Tabel 4.35 Bidang penggunaan dari bahan oksida magnetik.

Bahan magnetik lunak

i) Bahan inti magnetik frekuensi tinggi: Permeabilitas tinggi, kerugian magnetik rendah
   - ○ Inti lilitan magnet untuk gelombang radio frekuensi menengah
     Bahan: Ferit Ni–Zn, ferit Cu–Zn–Mg
   - ○ Inti lilitan magnet untuk kabel telekomunikasi (khususnya kerugian magnetik rendah)
     Bahan: Ferit Mn–Zn
   - ○ Inti magnetik untuk pesawat TV, transformer balik dan yoke difleksi
     Bahan: Ferit Mn–Zn

ii) Bahan memori magnetik: Histerisis magnetik persegi
   - ○ Elemen memori untuk komputer elektronik
     Bahan: Ferit Mn–Mg dan Li–(Mn, Ni)

iii) Bahan magnetik untuk gelombang mikro
   - ○ Penyerap gelombang radio: Isolator, sirkulator
     Bahan: Ferit Ni–Zn, garnet yitrium-besi dan turunannya (struktur garnet), ferit feroksplana (ferit heksagonal)

iv) Bahan magnetostriksi:
   - ○ Osilator magnetostriksi supersonik
     Bahan: Ferit Ni–Cu

v) Bahan untuk kepala magnetik: Baik dalam: ketahanan aus, masa jenis, pemagnetan jenuh, permeabilitas awal, T_c, dan tahanan listrik
   Bahan: Ferit dipres panas Mn–Zn atau Ni–Zn, atau ferit Mn–Zn kristal tunggal

vi) Ferit sensitif temperatur: Titik curie rendah, dan perubahan temperatur yang tajam dari permeabilitas awal
   - ○ Sensor sensitif temperatur dari tombol saluran sensitif temperatur
     Bahan: Ferit Mn–Zn

vii) Bahan untuk pemercepat partikel: Frekuensi tinggi, daya tinggi (kerugian histerisis di bawah fluks magnetik density tinggi)
   - ○ Rongga akselerasi frekuensi tinggi dari sinhrosiklotron
     Bahan: Ferit Ni–Zn–(Co)

Bahan magnetik keras: Gaya coercive tinggi, pemagnetan remanen tinggi

i) Corong suara, fone kepala, penerima dan alat akustik lainnya dalam medan magnetik yang mengembang
ii) Magnetron, penuntun gelombang mikro dalam medan magnet yang mengembang
iii) Amper meter, voltmeter dan alat pengukur lain dalam medan magnet mengembang
iv) Peralatan listrik seperti motor kecil, generator, mikromotor, motor histerisis, dst.
v) Penjepit magnetik, pengolah bijih magnetik, magnet karet, mainan, dst.

Bahan: Magnetoplumbit kristal heksagonal jenis ferit ($BaO \cdot 6Fe_2O_3$ atau $SrO \cdot 6Fe_2O_3$)

Bahan gelembung magnetik:
   - ○ Memori untuk komputer elektronik
     Bahan: Film kristal tunggal turunan tanah jarang-garnet besi (struktur garnet)

Bahan perekam magnetik:
   - ○ Bahan dari pita magnetik untuk merekam suara, gambar dan informasi
     Bahan: γ-Fe_2O_3 tidak bulat atau magnetit juga γ-Fe_2O_3 tidak bulat dilapisi senyawa kobal. CrO_2 tidak bulat sebagian (jenis rutil).

Catatan: Semua bahan yang tidak menunjukkan struktur adalah dari jenis spinel.

10.3 Bahan refraktori temperatur tinggi

Dengan berjalannya perkembangan teknologi, diperlukan bahan yang dapat tahan temperatur yang makin tinggi, dan pengembangan bahan tahan temperatur tinggi mempercepat kemajuan lanjut teknologi temperatur tinggi. Reaktor atom, Pembangkit Tenaga Magnetohidrodinamik (MHD), motor roket, turbin efisiensi tinggi adalah contoh terdahulu. Seperti telah ditunjukkan pada Gb. 4.22 dapat diperoleh banyak bahan yang memiliki titik cair dan temperatur penguraian di atas 2000°C. Tetapi jumlah bahan tersebut yang dapat dipergunakan secara praktis adalah terbatas sekali.

Oksida bersifat stabil kalau dipergunakan di udara atau pada medium pengoksid. Al_2O_3 (2015°C)* banyak terdapat di sumber dan dipergunakan secara luas. BeO (2550°C) adalah oksida yang memiliki konduktivitas termal tinggi dan secara kimia stabil baik sekali, tetapi mahal dan bersifat racun. CaO (2600°C) mempunyai sifat buruk mudah mengikat air meskipun disinter secara mampat MgO (2800°C) murah dan stabil terhadap logam cair tetapi mudah menguap. ThO_2 (3300°C) memiliki titik cair tertinggi di antara oksida-oksida, dan memiliki ketahanan panas sangat baik tetapi mengandung unsur radioaktif. Y_2O_3 (2410°C) banyak dipergunakan sebagai penyetabil ZrO_2 dan ia sendiri memiliki ketahanan panas yang baik. Tidak terdapat cukup banyak di alam dan mahal. ZrO_2 dapat distabilkan oleh Y_2O_3 atau MgO tetapi ZrO_2 yang telah distabilkan mempunyai titik cair rendah sedangkan yang murni titik cairnya 2677°C. Tetapi bahan ini sangat berguna sebagai bahan tahan panas dan sebagai keramik elektronik.

Dalam medium bukan pengoksid C (>3550°C), B_4C (2450°C) dan BN (~3000°C) dapat dipergunakan pada 2000°C atau lebih. BN heksagonal serupa dengan grafit dilihat dari strukturnya. Bahan ini merupakan isolator listrik dan disebut grafit putih dan memiliki sifat mekanik serupa dengan grafit. B_4C terkenal bukan sebagai bahan tahan panas tetapi dipakai untuk perkakas ultra keras sebagai mana halnya WC (2865°C) dan BN heksagonal. Di udara sampai 1500°C, SiC, Si_3N_4, AlN dan SIALON (Si_3N_4–Al_2O_3) tahan untuk dipergunakan. Bahan tersebut bukan saja tahan panas tetapi juga berkekuatan tinggi pada temperatur tinggi.

10.4 Karbon dan Grafit

Grafit mempunyai struktur kristal dengan jaringan lapisan teratur dari enam atom karbon terikat (Gb. 4.14). Ada beberapa jenis karbon dalam keadaan amorf dan juga berbagai keadaan tengah, antara keadaan amorf dan keadaan kristal. Secara morfologi karbon ada dalam berbagai bentuk; bubuk karbon aktif, pelumas padat dan karbon seperti gelas yang terlihat seperti gelas hitam yang sangat keras. Oleh karena itu jenis dan penggunaan karbon sangat luas yang diikhtisarkan dalam Gb. 4.60. Sekarang sudah ada produksi masa dari serat karbon yang elastik dan dengan sifatnya yang ringan bahan ini memberikan harapan pada berbagai penggunaan.

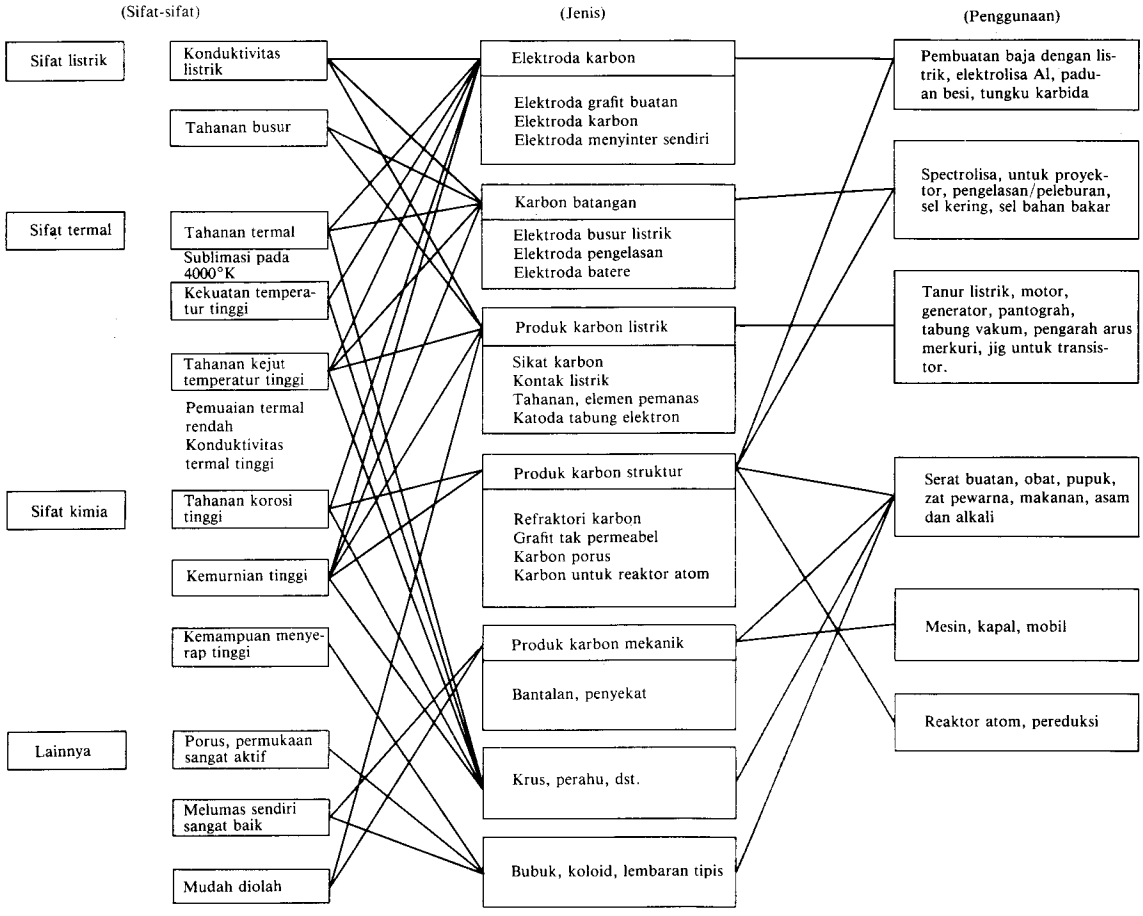
10.5 Keramik teknik

Mempergunakan keramik sebagai komponen penting dan presisi menghadapi banyak masalah. Kegetasannya menyebabkan sukar untuk dimesin, tidak cukup ulet dan tidak cukup kuat serta kualitasnya yang tidak merata. Akan tetapi kemajuan yang dicapai sekarang dalam teori dan teknologi keramik memberikan jalan untuk dapat memecahkan permasalahan di atas. Dalam penggunaan keramik yang berhubungan erat dengan mesin-mesin presisi, di bawah ini dijelaskan secara singkat mengenai sifat utama untuk setiap penggunaan dan bahannya yang disarankan.

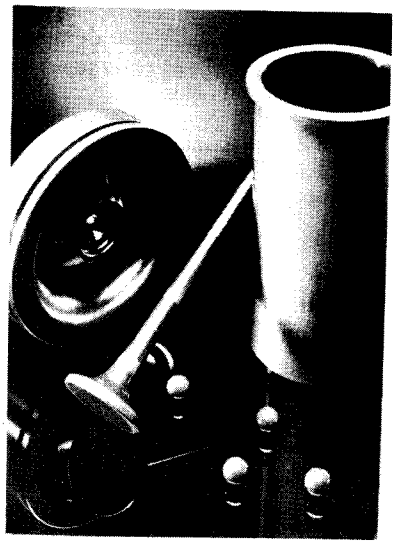
10.5.1 Bahan tahan panas dan berkekuatan tinggi

Bahan yang dipergunakan sebagai sudu turbin (Gb. 4.61) silinder ruang bakar tur-

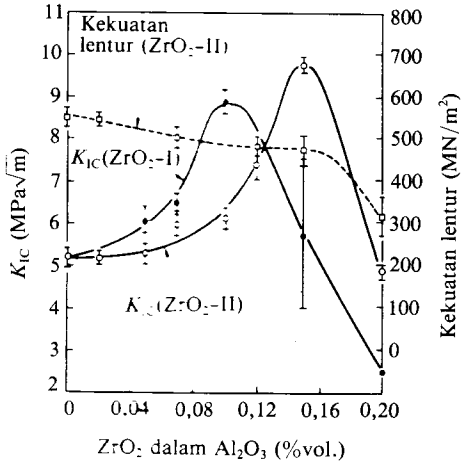
*Angka antara kurung menyatakan titik cair atau temperatur penguraian.



Gb. 4.60 Jenis dan penggunaan produk karbon.



Gb. 4.61 Komponen motor diesel dibuat dari Si_3N_4 dalam percobaan.



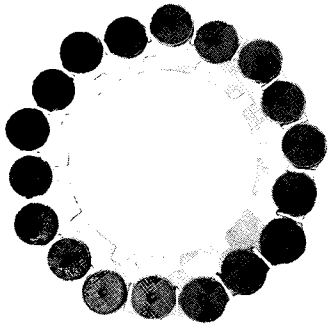
Gb. 4.62 Kekuatan lentur dan K_{IC} dari Al_2O_3-ZrO_2 (I dan II dengen bahan mula yang berbeda).

bin gas, motor diesel, penukar panas temperatur tinggi, dst, yang terutama memerlukan kekuatan temperatur tinggi, telah difikirkan untuk memakai senyawa kovalen seperti Si_3N_4, SiC dan SIALON. Evaluasi umum menyatakan juga bahwa Al_2O_3 merupakan bahan yang baik sekali dalam hal kekuatannya, ketahanan kejutan termal dan kestabilannya pada tempertatur tinggi. Sinteran yang mampat dari zirkonia yang distabilkan, baik sekali ketahanan termalnya dan mempunyai K_{IC} yang besar di antara keramik (menurut 2.1). Selanjutnya apabila partikel ZrO_2 halus didispersikan di dalam bahan sinteran lain, seperti ditunjukkan dalam Gb. 4.62, K_{IC} nya meningkat. Bagi bahan yang dipergunakan untuk penukar panas, terutama diperlukan sifat tahan kejutan termal yang biasanya digunakan kira-kira pada 1200°C atau di bawahnya, untuk itu dapat dipakai kordierit dan spodumen β yang kristalnya memiliki pemuaian rendah.

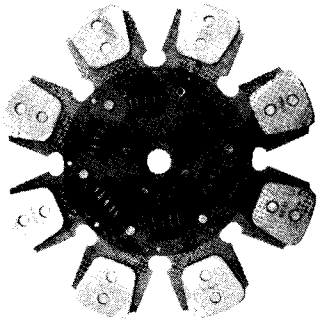
10.5.2 Bahan tahan aus dan permukaan halus

Keramik dipergunakan untuk penuntun benang mesin produksi serat sintetik, untuk bantalan, untuk penahan bocor pada pompa air dst. Untuk penggunaan ini sifat ketahanan aus, ketahanan korosi dan kehalusan permukaan keramik dimanfaatkan. Bahan khas untuk ini adalah Al_2O_3, dan bagi bahan Si_3N_4 sedang dijajagi untuk beberapa penggunaannya.

Dengan meningkatnya kecepatan dan ukuran pesawat terbang dan kereta api, temperatur kerja dari rem meningkat sangat. Untuk keperluan itu bahan cermet dari mulit-grafit-tembaga (campuran logam-keramik yang kompleks) telah menggantikan bahan tahan aus asbes yang biasa (Gb. 4.63).



(a) Lapisan rem pesawat terbang, mempergunakan cermet

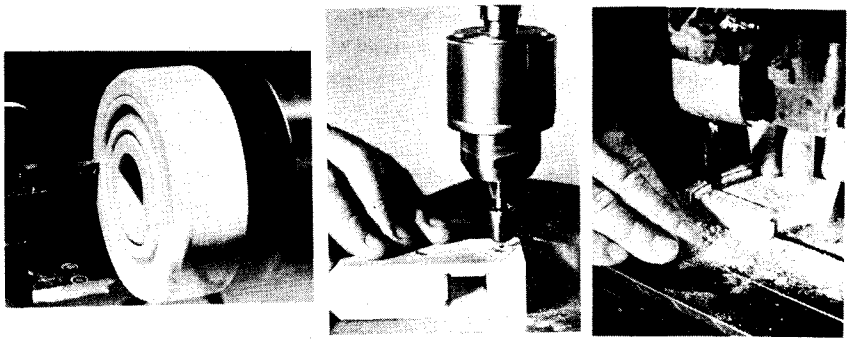


(b) Pelat kopeling bus, mempergunakan cermet

Gb. 4.63 Bahan gesek dari cermet.

10.5.3 Bahan mampu mesin

Keramik bersifat keras dan getas, sukar untuk dimesin. Tetapi sekarang, Al_2O_3 dan Si_3N_4 sinteran yang sangat mampat telah dikenal luas dapat dimesin secara presisi. Untuk pemesinan ini dipergunakan alat pemotong yang ultra keras yaitu intan dan alat khusus seperti mesin sinar elektron juga dipergunakan. Di lain fihak ada keramik halus yang dapat dilubangi dan dipotong dengan peralatan konvensional untuk pengerjaan logam. Bahan ini disebut keramik mika dan merupakan sinteran kompak yang terdiri dari mika atau gelas terkristalisasi dengan mika terendapkan (Gb. 4.64).



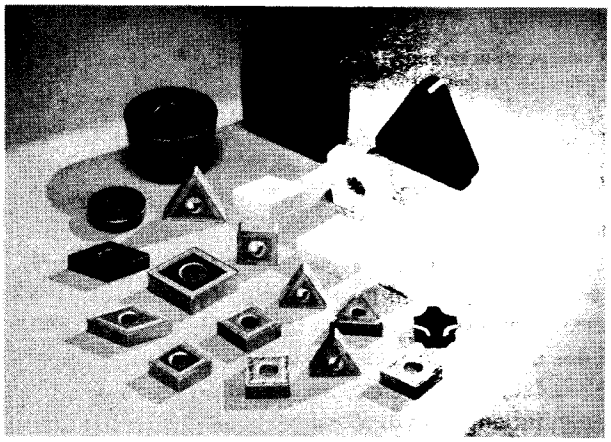
Gb. 4.64 Keramik mika dapat dimesin dengan mempergunakan perkakas kayu.

10.6 Perkakas pemotong

Perkakas untuk pengerjaan logam yang menggunakan kekerasan seperti keramik, digunakan secara luas. Ada dua kelompok bahan. Satu adalah cermet, yang ketahanan aus dan ketahanan panasnya seperti keramik dipadu dengan keliatan unggul dari logam, dan yang lain adalah keramik sinteran.

Cermet WC-Co, dalam mana bubuk WC dan logam Co disinter, Cermet WC-TiC-Co dan Cermet TiC-Ni-Mo, disebut paduan ultra keras dan digunakan untuk memotong baja (Gb. 4.65). Akhir-akhir ini penggunaan ujung pemotong yang terlapis meningkat. Pelapisan dengan TiC, TiN dan Al_2O_3 setebal kira-kira 5 μm diterapkan pada Cermet dengan metoda deposisi uap kimia (CVD), maka ketahanan arusnya sangat bertambah.

Pemotongan pada kecepatan tinggi dengan temperatur pada ujung pemotong yang mencapai 800–1000°C atau pemotongan bahan yang sukar dimesin seperti besi cor putih, baja tahan panas dan baja yang dikeraskan, agak susah dilakukan oleh perkakas Cermet tersebut di atas. Untuk keperluan itu digunakan perkakas yang dibuat dari Al_2O_3. Sinteran mampat dari Al_2O_3 yang sangat murni dan sinteran komposit mampat dari Al_2O_3 dengan penambahan TiC (Gb. 4.65). Di samping itu sinteran



Gb. 4.65 Cermet, ujung pahat alumina sebagai perkakas.

intan dengan aditif sedikit, dan perkakas terkeras kedua dari sinteran BN kubus terdapat di pasaran. Intan mempunyai kekurangan dalam mudahnya beraksi dengan besi, tetapi BN tidak, jadi untuk pemotongan paduan besi, bahan terakhir lebih cocok.

Beberapa angka dan daftar-daftar di dalam buku-buku yang tercantum di bawah ini telah dipergunakan di dalam Bagian IV buku ini. Pengarang Jepang mengucapkan terima kasih yang tak terhingga kepada para pengarang dan penerbit buku-buku ini.

1. R. W. Davidge: Mechanical Behaviour of Ceramics, 1979 (Cambdridge University Press)
2. S. Somiya: Hishinyamakinen Gijutsu Kōza (Iron and Steel Institute of Japan)
3. W. D. Kinjery et al.: Introduction to Ceramics, 1975 (John Wiley & Sons, Inc.)
4. Uitert et al.: Motor. Res. Bull, **12**, 261, 1977
5. N. Soga: Shokyu Ceramic Gaku, 1981 (Agne Publishing Corporation)
6. Glass Handbook, 1975 (Asakura Publishign Co., Ltd.)
7. B. Yoshiki: Kōbutsu Kōgaku, 1959 (Gihodo Shuppan Co., Ltd.)
8. Handbook of Chemistry, 1977 (Chemical Society of Japan)
9. Ceramics Zairyō Gijutsu Shusei, 1977 (Sangyo Gijutsu Center)
10. N. Calusse, et al.: Ceram. Soc. Bull., **56**, 1977

M I L I K
Perpustakaan Nasional
Propinsi Jawa Timur